

21世紀를 向한 高速增殖爐

1987년 9월 미국 워싱턴주 리치랜드에서 美國原子力學會와 유럽 原子力學會가 공동으로 개최한 「高速增殖爐의 경험과 경제적인 發電을 위한 方向」이라는 主題의 學術회의에서 世界各國은 상업용 고속로의 개발에 큰 관심을 기울이고 있음을 보여주었다. 다음은 인도를 제외한 고속로의 개발국들이 모두 참석한 이 회의에서 논의되었던 주요 개발동향을 정리하여 英國原子力公社(UKAEA)의 R. F. Burstall박사가 ATOM誌에 게재한 內容이다.

일부 국가에 있어서 原電 建設이 停滯狀態에 있고, 우라늄이 풍족하게 공급되고 있으므로 高速爐는 다른 爐型에 비해 아직 經濟性的 면에서 뒤떨어지며, 특히 反核主義者들은 고속로에 대해서 부정적이다. 따라서 이런 관점에서 볼 때, 본 會議의 개최 시기가 적절하지 않다고 볼 수 있다고 프랑스의 Vendryes씨가 기조연설에서 말했다.

그러나 프랑스는 앞으로 10년 이내에 에너지 需要의 증가 및 노후 발전소 교체의 必要性이 대두됨에 따라 원자력사업의 확장이 불가피하다고 지적했다. 과거의 경험에 의하면 우라늄을 포함한 燃料의 수급과 가격은 급격히 變動할 소지가 있기 때문에 高速爐와 核燃料再處理를 선택함으로써만 核燃料의 對外依存度를 탈피할 수 있다고 주장하였다.

본 회의에서는 輕水爐 水準으로 고속로의 비용을 절감하는 방안이 주로 논의되었으며, 현재 상당히 낙관적인 것으로 나타났다. 즉, 언젠가는 고속증식로의 채택이 불가피하게 되므로

그 과도기에 고속로와 핵연료주기의 안전성 및 경제성을 충분히 입증시킬 필요가 있다고 하였다.

고속증식로와 관련 핵연료주기의 건설 및 운영 경험은 이미 상당한 기술수준에 올라서 있다. 表1은 건설 및 운전중인 고속로의 현황이다. 물론 열제거계통 및 증기발생기에 적지 않은 난점이 있으나, 설계개념 자체를 의심할 만큼 심각하지는 않으며, 또한 몇몇 原型高速爐는 매우 높은 稼動率을 보여주고 있다.

核燃料週期

英國原子力公社의 Allardice씨와 다른 유럽의 전문가들은 高速爐用 核燃料週期の 현황과 전망을 검토하였다. 지난 20년간 많은 경험이 축적되었으며, 35만개 이상의 핵연료봉을 제작 사용하였음에도 불구하고 연소중에 결함이나 방사성물질의 누출을 일으킨 것은 50개 미만이라고 밝혔다. 일본, 미국 및 소련도 핵연료봉 제

작에 많은 경험을 쌓아 왔다.

한편 再處理에 대한 경험도 많이 축적되었다. 프랑스와 영국이 이 분야에서 선도적인 위치에 있으며, 일본과 서독이 제한적이기는 하나 경험을 갖고 있다. 프랑스에서는 Rapsodie와 Phenix 고속증식로에서 나온 핵연료를 사용하여 22톤의 混合酸化物核燃料(MOX)를 재처리하였으며, 영국은 PFR 고속로의 혼합산화물핵연료 약 10톤을 재처리하였다. 핵연료 연소도가 목표치에 도달하였고, 재처리전에 최소냉각기간을 가짐으로써 재처리시설의 設計파라미터가 대폭 개선되었으며, 처리공정이 매우 효율적이 입증되었다. 즉, 핵분열생성물의 제염계수는 10^7 이상, 플루토늄 회수율은 99.5% 이상이였다.

프랑스와 영국의 성공적인 경험으로 매년 60~70톤의 금속핵연료처리가 가능한 대규모 재처리시설의 설계가 가능하였다. 兩國의 재처리 공정은 액체-액체 용매추출법을 이용하는데, 공장은 여러 종류의 工程セル(Cell)로 구성되어 있고 장비로는 Pulsed Plate Column Contactor와 Mixed Settler를 사용한다. 양국의 공정사이에 차이가 있다면 영국은 핵연료봉을 50개씩 절단하여 बै치(Batch) 방식으로 용해시키지만, 프랑스에서는 핵연료봉을 1개씩 절단하여 나선형 용해기를 이용하여 연속적으로 용해시킨다는 점이다.

핵연료의 재처리 및 성형가공기술은 유럽과 기타 지역에서 활발하게 개발되고 있다. 즉, 새로운 핵연료펠렛 성형가공공정이 방사선피폭의 저감과 비용의 절감을 목표로 개발되고 있다. 그 한 例로서, 영국 Windscale에 위치한 UKAEA 연구소의 Facet시설은 방사성 분진의 발생량을 최소로 할 수 있다. 이 공정은 산화우라늄(UO_2)과 산화플루토늄(PuO_2) 분말에 소결제(Binder)를 첨가한 후 성형·가압·소결하는 방법을 사용한다.

核燃料成型加工 技術改善의 또 다른 측면은 燃燒度の 증가이다. 핵연료피복재는 연소도의

증가로 인해 더욱 심해지는 放射線照射에 견딜 수 있어야 한다. 이 분야에 대해서 영국의 Swanson은 PFR 원자로를 이용한 爐內實驗의 現況과 앞으로의 계획을 발표하였다. 이 실험에서는 여러 종류의 직경을 갖는 핵연료봉들에 대해 최소한 20%의 연소가 이루어 질 때까지 방사선을 照射시킨다.

실험에 사용되는 피복재는 주로 니켈크롬합금인 PE16이다. 벨기에에서도 新素材에 대해 연구가 활발히 진행되고 있는데, 현재 두 종류의 材料가 가장 유망하며 모두 철합금으로서 하나는 산화티타늄을, 또 다른 하나는 티타늄과 산화이트륨을 포함하고 있다. 이 재질들은 高放射線 및 高溫下에서도 기계적 특성을 유지하고, 핵연료의 제조가 용이한 특성을 갖고 있다.

유럽에서 현재 개발되고 있는 재처리 공정들은 공정단계의 수를 줄이고 설계를 단순화시키는 목표를 하고 있는데, 주요 개발사항은 다음과 같다.

· 핵연료의 용해에 있어서 용해기의 설계와 대체 化學劑 개발에 역점을 두고 있다. 영국은 Pulsed-Vee 용해기를 개발했는데, 핵연료피복재가 酸의 流動方向에 逆流하도록 되어 있다.

· 접촉기(Contactor)를 더욱 콤팩트화하는 노력도 경주되고 있다. 遠心型 접촉기의 개발이 이에 해당되는데, 용매에 대한 放射線照射의 영향을 감소시키는 장점도 있다. 새로운 용매로서는 카르복실酸아미드가 고려되고 있다.

· 또한 방사성폐기물의 琉璃化가 가능하도록 액체폐기물內的 나트륨 함량을 최소화시키고 있다. 이를 위해 無鹽製劑를 사용하는 방안이 고려되고 있다.

高速增殖爐 運轉經驗

영국의 Broomfield씨는 서유럽의 고속로 운전경험을 발표하였다. 영국은 PFR, 프랑스는

및 원자로 운전, 폐기물의 所內저장에 대한 인허가를 아직 받지 못하고 있다.

영국의 PFR에서 운전초기에 나타났던 증기 발생기와 관련된 문제점들은 이미 소개된 바 있는데, 최근에 다시 과열기(Superheater)에서 2차나트륨계통과 증기계통간의 누설이 발견되었다. 특히, 최근에 있었던 누설은 그 양상이 초기의 증상과 달라서 원래의 튜브를 개량형으로 교체하였다. Phenix의 경우에는 중간열교환기에서 소규모 나트륨의 누설, 2차계통 주배관의 누설, 2차계통 펌프의 진동 등이 문제가 되고 있다.

일본의 경우 Joyo, 미국의 경우 FFTF, 소련의 경우에는 BN-600을 통해서 많은 경험이 축적되고 있다. 이들은 양호한 가동률을 보여 주고 있으며, 심각한 문제가 발생된 적은 없었다.

세계 최초의 大型 고속증식로인 Superphenix는 1986년도 말에 全出力(1,200MWe) 운전을 개시했는데, 1987년 3월 핵연료저장드럼에서 나트륨 누설이 발견되었다. 누설된 나트륨은 누설재킷에 收用되어 있으며, 다른 機器에 피해를 주지도 않았고, 원자로 및 냉각계통에 대해서도 위험성을 증가시키지 않았다. 누설부위는 영국과의 협조하에 1987년 9월 탐지해냈으나, 원자로의 再稼動 및 핵연료드럼의 補修에 대한 결정은 아직 이루어지지 않고 있다.

유럽내에서는 공동연구를 위한 협력이 점차 증가하고 있다. 1984년도에 연구개발협력을 위한 양해각서가 영국, 프랑스, 서독, 이탈리아 및

소련	BR-10	10 / 0	1973
영국	PFR	670 / 250	1974
서독	KNK-II	58 / 21	1977
일본	JOYO	100 / -	1977
소련	BN-600	1470 / 600	1980
미국	FFTF	400 / -	1980
建設中			
서독	SNR-300	762 / 312	1988 ²
이탈리아	PEC	118 / -	1989
일본	MONJU	714 / 280	1991
소련	BN-800	2100 / 800	
設計研究中			
프랑스	Superphenix-II	3600 / 1500	
서독	SNR-2	3420 / 1300	
인도	PFBR	1250 / 500	
일본	DFBR	2550 / 1000	
소련	BN-800	2100 / 800	
소련	BN-1600	4200 / 1600	
영국	CDFR	3300 / 1450	

(註)1. 일부의 열을 담수화에 사용

2. 運開가 인허가문제에 의하여 지연

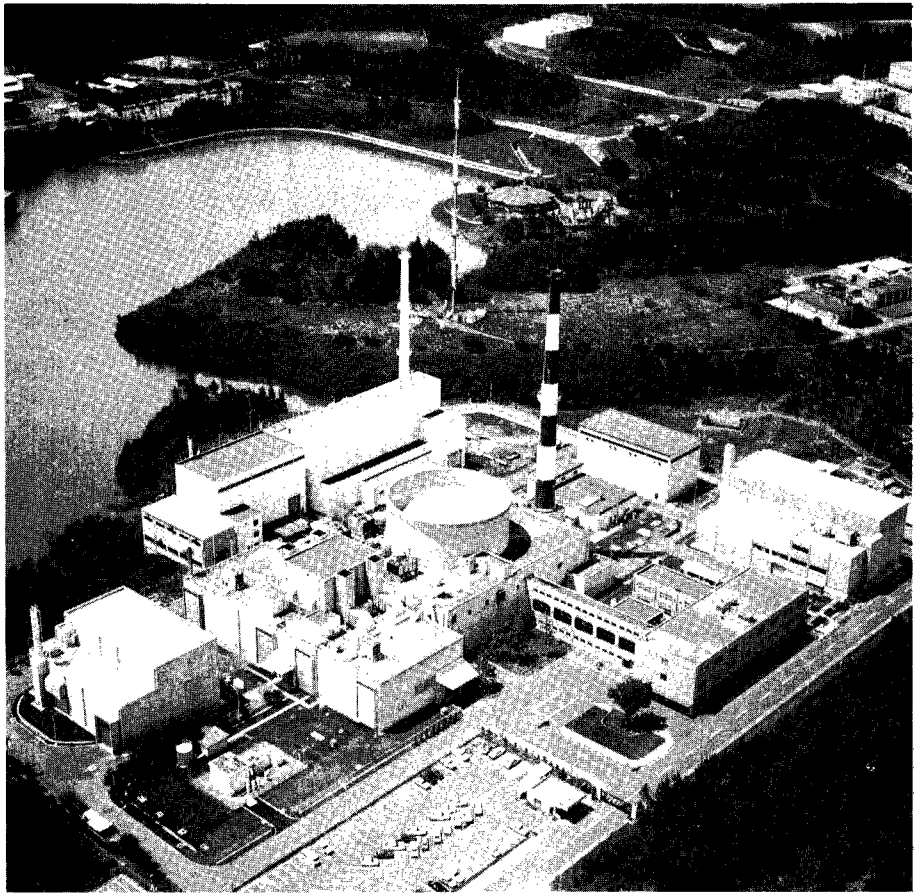
벨기에 간에 서명되었다. 연구개발협약이 아직 정식으로 서명되지는 않았지만 효력은 발휘되고 있는데, 常設事務局內의 집행위원회가 이를 관장하고 있으며, 기술적인 사항은 주제별로 11개 분과위원회에서 관장하고 있다.

서독의 Eitz씨는 앞으로 유럽에서의 고속증식로 개발에 대해 제의하였다. 유럽高速爐電力會社그룹(Efrug)은 고속로의 개발노력을 집중시키고 자원을 효율적으로 활용하기 위하여 지금보다 더욱 긴밀한 협력이 전력회사, 설계회사 및 연구개발기관사이에 요구된다고 하였다. 또한 각국이 고유의 설계를 각자 진행하는 것 보

있다.

일본의 경우 Joyo, 미국의 경우 FFTF, 소련의 경우에는 BN-600을 통해서 많은 경험이 축적되고 있다. 이들은 양호한 가동률을 보여

인도	PFBR	1250 / 500	
일본	DFBR	2550 / 1000	
소련	BN-800	2100 / 800	
소련	BN-1600	4200 / 1600	
영국	CDFR	3300 / 1450	



▶ 日本의 고속실험로 「Joyo」의 全景.

다는 공동설계를 수행하는 방향으로 계획이 수립되어야 한다고 했다. Efrug는 이 분야의 습意點을 찾기 위한 논의가 절대로 필요하다고 강조하였다.

建設費의 低減

최초의 상업용 고속증식로인 Superphenix는 비록 처음부터 예상하긴 했어도 프랑스의 PWR보다 발전단가는 50% 이상, 자본비는 약 2배 정도 높다. 그러나 이 비용면에서의 차이는 다수기 건설의 利點과 현재의 연구개발 소요비용을 감안하지 않았기 때문에 발생한 것이다. Superphenix를 다수기 건설할 경우 25%의 비용절감이 기대되며, 또한 많은 연구결과들이

핵연료주기, NSSS, BOP와 관련된 비용의 절감이 가능성을 보여주고 있다.

핵연료주기비용 절감을 위해서는 우선 연소도를 증가시켜야 하고, 축방향의 非均質핵연료봉을 채택하여야 하며, 핵연료의 體積比도 고려되어야 한다.

영국 NNC의 Vaughan씨는 영국, 프랑스, 서독에서 최근 개발한 설계를 소개하였다. 세가지 설계 모두 Superphenix보다 상당한 개선이 이루어졌으며, 발전소 전체로 볼때는 30%, NSSS에 대해서만은 40%의 비용절감이 예상된다. 새로운 설계에서는 Superphenix의 1,240MWe보다 높은 1,450MWe의 전기출력을 갖는데 Superphenix와 같은 수의 일차냉각회로, 펌프, 중간열교환기, 그리고 약간 작은 직경의 원자

로용기를 사용하고 있다. 만약 일차냉각회로를 4개에서 3개로 줄이고, 원자로용기의 직경을 더욱 줄일 수 있으면 비용절감효과는 더욱 클 것이다.

NSSS의 비용절감은 고속증식로를 연구하고 있는 모든 국가에서 추구하고 있는데, 특히 일본과 프랑스의 研究結果가 주목할 만 하다. 즉, 대부분의 비용절감은 철강재 소요량을 절감하고 나트륨 소요량의 감축으로 가능하기 때문에 모든 主機器들(펌프, 중간열교환기, 핵연료취급용 회전플러그, Diagrid, 노심지지구조물 등)의 중량을 줄이기 위한 연구가 수행되어 왔다.

배관작업량의 감축, 즉 콤팩트한 설계와 벨로우조인트의 사용으로 철강재 소요량을 줄이고, 자연순환에 의한 잔열제거가 가능함이 原型爐에서 입증됨에 따라서 잔열제거계통을 단순화하는 방안도 도출되었다. 또한 假想爐心崩壞事故(HCDA)를 설계기준사고에서 제외함이 가능하다는 최근의 動向에 따라 계통의 單純化가 기대된다.

BOP의 비용절감은 가능한한 기자재를 공장에서 미리 제작하여 건설기간을 단축하고, 殘熱除去系統을 受動系統으로 改善하여 비상전원 공급요건을 완화시키고, 안전성 관련계통을 원자로격납용기내에 집중시켜서 다른 건물들의 방호요건을 완화시킴으로써 가능하다.

미국의 경우, Clinch River 高速爐의 건설 중단은 고속로의 개발방향이 전환되었음에 基因한다. 금속핵연료를 이용하는 소형의 고속로(140MWe~415MWe)에 관한 많은 연구가 있었다. 소형로의 장점은 기자재들을 공장에서 제작하여 육로, 철도, 船便 등으로 공사현장으로 반입할 수 있고, 다수의 同一한 소형모듈을 건설하는 것이 소수의 대형모듈을 건설하는 것보다 비용면에서 유리하다는 것이다. 즉, 여러 세트의 기자재가 필요함에도 불구하고 경수로보다 저렴할 수가 있는 것이다.

금속핵연료는 우수한 熱傳導性과 安全性을

갖고 있다. U-Pu-Zr 合金으로 된 핵연료는 EBR-2에서 실험한 바 있는데, 매우 높은 增殖率을 보여주었다. 이 경우 再處理는 미국에서 현재 개발중인 Pyro-Metallurgical공정에 의해 수행될 것이다.

그러나 이러한 미국의 동향에 대해 서독의 Hennies씨는 장점이 있긴 하지만, 여러가지 불리한 점들도 많다고 주장했다. 즉, U-Pu-Zr과 같은 三重合金핵연료와 Pyro-Metallurgical공정에 대한 이제까지의 경험이 충분하지 못하여, 금속핵연료의 구조와 放射線照射特性이 복잡하며, 열전도도 또한 모든 조건에서 확실히 밝혀지지 않았으며, 핵연료의 成型加工 및 재처리가 모두 고온에서 이루어져야 하므로 원격조작이 필요하다고 지적하였다. 그는 유럽국가들은 산화핵연료의 개발을 계속해야 하며, 미국의 시도는 보완적인 것으로 보아야 한다고 주장하였다.

설계를 개선하는데에는 많은 주의가 필요하다. 어떠한 설계개선에서도 이제까지 축적된 지식에 혼란을 가져와서는 곤란하다. 2030년대의 고속증식로 설계를 주제로 한 패널토론에서 모든 발표자들은 유의할 만한 설계상의 變化는 없을 것으로 전망하였다. 즉, 설계개선을 통한 비용절감의 노력은 기존의 지식과 균형을 이루어야 한다고 하였다.

結 論

고속증식로의 基本的인 설계개념에 대해서는 광범위한 意見一致가 이루어져 있으며, 經濟性側面에서 보더라도 기존의 輕水爐와 경쟁이 가능할 정도로 기술은 개발되어 있다.

모든 비용의 비교결과에 의하면 21세기초에 多數基 건설을 실행할 경우 다른 에너지시스템과의 경쟁이 가능할 것으로 전망된다. 이번 회의에서는 고속증식로는 미래의 電力源이 될 것임에 틀림없다고 결론내렸다.