

輕水爐와 高速爐의 類似點과 相違點

最近 原子力發電은 에너지 安定供給源으로서 확고한 위치를 차지하고 있다. 특히, 輕水爐는 각종 개량이 추진되어 높은 가동률을 보임에 따라 경제성이 우수한 플랜트임이 입증되었다. 또한 高速增殖爐도 核燃料의 증식이라는 사명을 갖고 實證爐의 개발노력이 집중되어 장래 에너지源의 주류가 될 것으로 기대되고 있다. 이러한 狀況下에서 兩者에 대해 개발의 역사를 되돌아 봄과 동시에 서로 기술적 특징을 비교해 보는 것도 여러 의미에서 중요할 것이다.

1. 序 論

원자력발전은 최근 현저한 진전을 보여 에너지 안정공급원으로서 확고한 위치를 차지하고 있다. 특히 輕水爐(LWR)는 沸騰水型爐(BWR), 加壓水型爐(PWR) 모두 각종 개량이 이루어진 결과 높은 가동률을 보임에 따라 경제성도 뛰어난 플랜트임을 입증했다.

한편, 高速增殖爐(FBR)는 핵연료의 증식이라는 사명을 갖고 세계 각국에서 各種 爐의 실험 및 原型爐가 제작되어 운전된 결과 爐物理, 爐工學的으로 안정된 특성을 나타내어 장래에 대한 전망을 밝게 했다. 때문에 잇달아 실증로의 개발노력이 계속되어 장래 에너지원의 주류가 될 것으로 기대되고 있으며, 현재 경제성의 면에서도 LWR에 견줄만한 전망을 얻기 위해 합리적인 설계가 추진되고 있다.

최근 LWR은 現行爐를 더 고도화시키거나, 핵연료의 轉換比를 올리는 高轉換爐, 수동적인 안전성을 갖게 한 고유의 안전로, 자연순환을 채용한 中小型爐 등 새로운 爐型이 계속 제안되어 왔다. 특히 고유안전로라 부르는 爐型은 종래의 LWR과 전혀 다른 독창적인 개념의 도입이 강하게 요망되고 있다.

또 FBR도 경제성의 향상을 도모할 목적으로

탱크형 FBR의 爐容器 コンパクト化를 도모하거나 루프型爐의 배관길이 단축화를 도모하는 등의 개발이 계속되고 있다. 더욱 GE社의 PRISM과 美전력중앙연구소의 2중탱크로 등 독창적인 爐型도 제안되어 설계연구가 되고 있다.

이와 같이 LWR, FBR 모두 새로운 전개가 되고 있는 때에 그 양자에 대해 개발의 역사를 되돌아 봄과 동시에 개발결과중에서 상호 기술적 특징을 부각시키는 것은 중요하다.

최근 FBR실증로의 개발에 LWR의 기술자가 참가하도록 되어 있으며, 반대로 FBR개발의 경험만을 갖고 있는 고속로 기술자도 있다.

영어에 대단히 능한 사람이 독일어 등의 다른 외국어에 도전함으로써 비교언어학이라고도 말할 수 있을 만큼 쌍방의 어휘가 늘어 쌍방 문화권의 이해가 진전되는 것은 자주 듣는 이야기이다. 고속로와 경수로의 기술자가 쌍방 기술의 진수는 물론이고 서로의 기술에 있어서 유사성과 상위성을 인식하는 것이 고도화된 경수로의 선진기술을 흡수하게도 되어 보다 나은 고속로를 만드는 지름길이 아닐까.

한편 FBR은 각국이 협조와 경쟁하에서 계통적인 연구개발을 실시해 왔는데, 이 경위는 LWR을 고도화하고 새로운 爐型을 개발하는데서 배울 바가 있을 것이다.

2. 開發의 歷史的 經緯

(1) 發電爐 開發의 開幕

지금부터 36년 전 고속증식실험로 EBR-I은 미국 아이다호국립시험장에서 高速中性子爐에 의한 증식의 가능성을 실증함과 아울러 세계 최초로 발전에 성공했다. 이것은 원자력이 장래 動力爐로서 인류의 평화이용에 공헌할 수 있다는 꿈을 심어 준 큰 계기가 되었다. 또 역사상 최초의 발전로가 FBR에 의해 달성되었다는 점에서 특기해야 할만한 일이다.

FBR의 역사는 1943년 물리학자 엔리코·페르미가 우라늄속에 99.3%를 차지하는 U^{238} 을 고속중성자에 의해 Pu로 바꿈으로서 2차적으로 우라늄자원을 확대할 수 있는 증식로의 가능성에 대해 검토한데서 시작된다. 그 이래 「고속로를 제어하는 것은 세계 원자력을 제어하는 것」이라는 유명한 말은 잘 알려져 있다.

1945년 제2차 세계대전의 막이 내린후 원자력의 평화이용을 추진하기 위해 1947년 1월에 미국원자력위원회(US, AEC)가 설립되었다. AEC는 미국의 평화이용 동력로 개발계획으로서 당시 경수로(BWR, PWR), 均質爐, Na冷却 黑鉛減速爐, Na냉각 고속증식로 등 5개 爐型의 추진을 책정했다.

당시 아르곤국립연구소를 중심으로 한 기술팀은 고농축 우라늄235를 연료로 하고, 냉각재로서 나트륨·칼륨합금(NaK)을 사용한 고속증식로의 개념에 대해 기초적인 개발연구를 실시하고 있었다. 원자력위원회 내에 원자로개발의 경험을 가진 사람이 거의 없었던 관계로 미국 최초의 動力爐開發프로젝트로는 실적이 있는 아르곤연구소의 증식로가 선택되어 예산을 배정받게 되었다.

이 원자로 EBR-I은 아이다호홀즈의 황무지 한 구획에 건설이 추진되어 1951년 임계에 도달한후 발전기에 접속되어 전등으로 찬연히 빛을 발하였다. 그후 전기출력 45KW로 所內電力을 공급했다. 1955년 11월 燃料溶融에 따라 정지되

었으나, 1958년 제3차 改良爐心에 의해 재개되어 1961년에 이르기까지 주로 운전요원의 훈련용으로 제공되었다.

1965년 Pu연료를 장전한 爐心에 의한 세계에서 최초의 발전을 한 EBR-I은 그 역할을 끝냈는데, 그동안 10여년에 걸쳐 NaK냉각에 의한 FBR 제특성의 데이터를 취득하여 증식성의 검증을 했다. 오늘날 원자력발전의 프로토타입이 된 의의는 높이 평가된다.

(2) 輕水爐의 時代

1950년대 초기부터 미국에서 그때까지 주로 군사용으로 개발되어 온 원자력을 평화이용으로 전개하는 시대가 시작되었다. 미국원자력위원회는 원자력발전개발 5개년계획을 발표하여 산업제도 급속히 동력로의 개발로 집결해 갔다.

이 무렵 아르곤국립연구소에서는 해군의 요청에 따라 잠수함용 加壓水型原子爐의 연구를 계속해 왔으나, 그 실질적인 개발을 계속해 온 것은 WH社였다. 때문에 원자력위원회는 1953년 PWR에 의한 최초의 원자력발전소 건설계획을 발표하여 WH社가 중심이 되어 1954년 시핑포트에 공사가 시작되었다.

한편 지금까지 沸騰을 일으키는 원자로는 反應度 변화 때문에 불가능하다고 생각되고 있었으나, 거대한 열교환기가 불필요한 동력로로서 BWR의 아이디어가 급속히 구체화되어 갔다. 이 실험적인 실증은 1953년 아르곤의 BORAX라 불리는 소형 실험로에 의해 안전성이 확인된 후 발전로로서의 전망을 얻었기 때문에 EBWR의 건설에 이르렀다. 더욱 GE社는 독자적으로 소형 실증로 VBWR을 건설했다. 이 VBWR은 1955년 설계공사가 착수되어 매우 짧은 기간인 1956년 10월에 완성되어 시핑포트의 PWR 보다 1년 빨리 발전을 개시했다.

GE사는 그 무렵부터 BWR의 개발에 전력투입하여 연료와 재료의 시험을 위한 원자로 GETR을 건설하여 경험을 쌓으면서 세계 최초의 상용 BWR로서 Dresden 1호로를 1959년에

(表 1) BWR의 歷史年表 (着工年 기준)

| 項目 | 年度 | 1955 | 1960 | 1965 | 1970 | 1975 | 1980 | 1985 | | |
|------------------|----|--------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------|-----|
| 美国의 動向 | | BWR-1 Dresden 1 | | BWR-3 Oyster Creek | BWR-3 Dresden 2 | BWR-4 Vermont Yankee | BWR-5 Lasalle 2 | BWR-6 Grand Gulf 1 | | |
| 日本의 動向 | | △ 原電設立 | △ JPDR 初發電 | DWR 2 敦賀 -1 | DWR 3 福島 1-1 島根-1 | BWR-4 福島1-2~5 浜岡-1, 2 女川-1 | BWR-5 東海-2 福島1-6, II-1 柏崎-1 | BWR-5 (改良標準型) 福島II-2~4, 浜岡-3 島根-2, 柏崎-2, 5 | | |
| 型名 | | BWR-1 | BWR-2 | BWR-3 | BWR-4 | BWR-5 | | BWR-6 | ABWR型 | |
| 仕樣 | | | | | | G | E | 型 | 日本改良型 | |
| 燃料型式 (初裝填燃料) | | 6×6 | 7×7 | 7×7 | 7×7 | 8×8 | 8×8 | 8×8 | 8×8 | 8×8 |
| 炉心出力密度 (kW/ℓ) | | 31 | 34 | 41 | 51 | 51 | 51 | ~54 | 44~51 | |
| 炉心冷却水 強制循環方式 | | 펌 | 프 | 펌 프+제트펌프 | | 펌 프+5노즐 제트펌프 | | | 圧力容器 内藏펌프 | |
| 非常用炉心 冷却 | | 2 CS | HPCI追加 | LPCI追加 | | HPCS追加 | | | CS, CI削除 2-HPCI | |
| 原子炉格納容器 | | 球形드라이 | MARK-I | | MARK-I/II | MARK-II | 改良標準型 MARK-I/II | MARK-III | ABWR型 | |
| | | 鋼製 | | | 鋼製 | 鋼製콘크리트 | 鋼製 | 콘크리트製 | 鋼/콘크리트 | |

註: 略語說明 CS (炉心 스프레이) CI (炉心注水) LP (低圧) HP (高圧)

鋼製 콘크리트

완성시켰다. 따라서 Dresden 발전소의 운전이 개시된 1960년대에 본격적인 원자력발전소의 시대로 들어갔다.

소련은 미국과는 완전히 독자적으로 PWR을 개발하여 1963년에 전기출력 196MWe의 Novovoronezh가 운전을 개시했다.

일본에서 최초의 동력로(JPDR)가 임계에 이른 것은 1963년 8월인데, 그 무렵부터 표1에서 볼 수 있듯이 BWR은 급속히 개량되어 갔다.

먼저 격납용기가 球型드라이이형에서 鋼製의 MARK-I형으로, 그리고 MARK-II형으로 바뀌어 갔다. 특히 특징적인 변화는 냉각수의 순환방식이다. 순환방식으로 초기 무렵 Humbolt나 당초의 JPDR과 같이 자연순환방식이 채용된 예도 있으나, 그후는 출력증대의 관점에서 거의 강제순환방식을 채용하고 있다. Dresden 爐 등 초기의 BWR(BWR-1, BWR-2)에 채용된 것은 냉각수를 전부 외부루프에서 재순환하는 방식인데, BWR-3부터는 배관파열사고시 노심 노출방지의 관점에서 제트펌프가 채용되게 되었다. 더 나아가서는 ABWR로서 압력용기 內藏펌프로의 개량이 추진되고 있다.

한편 PWR은 표2에서 볼 수 있듯이 시핑포트 爐에 이어 Yankee Rowe 등 급속히 大型商用爐가 개발되어 건설·운전에 들어갔다. PWR의 큰 과제였던 증기발생기의 개량에 특히 힘을 기울였다. 격납용기도 내부에 열음을 저장하여 냉각수 누수시의 압력상승을 억제하는 독특한 설계를 취하고 있는 아이스컨덴서형 등도 있어서 개량·변천의 모습을 볼 수 있다.

BWR, PWR 모두 전기출력의 증대에 따라 연료집합체당 연료봉수를 늘려 연료교환기간의 단축을 도모하고 있다. 또 노심의 출력밀도도 BWR이 31KW/ℓ에서 54KW/ℓ로, PWR은 71KW/ℓ에서 105KW/ℓ로 모두 증대된 것이 특징이다.

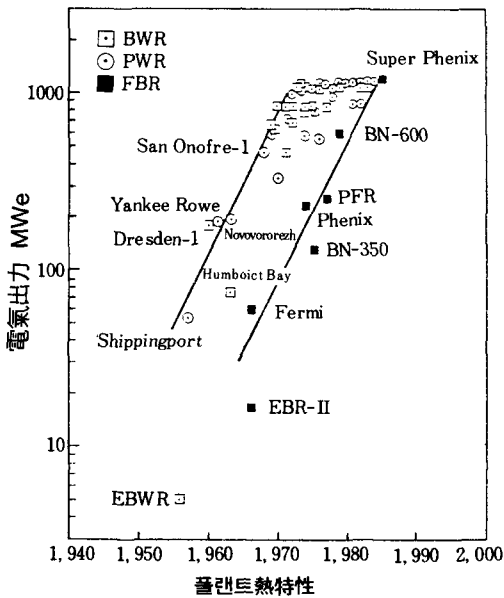
이와 같이 경수로의 역사적인 개량의 주목표는 노심연료와 격납용기, 그리고 BWR의 냉각수 순환방식, 비상노심냉각계통과 PWR의 증기발생기에 있다.

그림1은 BWR과 PWR 그리고 FBR을 합친 발전플랜트의 運轉開始年度와 전기출력의 변천을 나타낸 것이다. 初期商用爐가 운전해 들어가고 나서 약 12년만에 한단위 출력이 큰 1,100

(表 2) PWR의 歷史年表 (着工年 기준)

| 項目 \ 年度 | 1955 | 1960 | 1965 | 1970 | 1975 | 1980 | 1985 |
|--------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|
| 美國의 動向 | 100MW 급 Shipping Port | 200MW 급 Yankee Rowe | 600MW 급 Connecticut Yankee | 900MW 급 Indian Point 2 | 1100MW 급 Zion 1 Sequoyah 1 | 1300MW 급 South Texas 1,2 | |
| 日本의 動向 | △ 原電設立 | △ JP DR 初發電 | (2 루프) 美浜-1 | (3 루프) 美浜-2 | (4 루프) 美浜-2 玄海-2 伊方-2 高浜-1 高浜-2 高浜-3 | 600MW 급 泊-1, 2 | 900MW 급 川内-1, 2 高浜-3, 4 |
| | | | | | 1100MW 급 大飯-1, 2 | 1100MW 급 (改良標準型) 敦賀-2 | |
| 플랜트급 | 300MW 급 | 600MW 급 | 900MW 급 | | 1100MW 급 | | |
| 仕 様 | | | W 社 製 | 日本改良型 | W 社 製 | 日本改良型 | |
| 루 프 数 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | |
| 燃 料 型 式 (初裝填燃料) | 14×14 | 14×14 | 15×15 | 17×17 | 17×17 | 17×17 | |
| 炉心出力密度 (kW/l) | 71 | 83~95 | 92 | 100 | 105 | 105 | |
| 蒸氣發生器 | CE型 | 44, 51, 51M型 | 51型 | 51M, 51F型 | 51型 | 51F型 | |
| 原子炉格納容器 | 鋼製세미더블型 | 鋼製세미더블型 鋼製더블型 | 鋼製세미더블型 鋼製더블型 | 鋼製더블型 | 아이스콘덴서H型 | PCCV(半球型) | |

註: 略語說明 PCCV: 프레스트레스드 콘크리트 製格納容器



(그림 1) 主要한 BWR, PWR, FBR의 電氣出力變遷

MWe급의 경수로가 출현하고 있다. 또 이 출력증대의 경향은 전세계에서 건설된 FBR의 출력증대 경향과도 유사한 점이 흥미롭다.

(3) FBR의 開發

1955년대가 되자 표3에서 보듯이 FBR실험로가 전세계 곳곳에서 잇달아 건설되기 시작하여

본격적인 FBR개발로 들어갔다. 미국에서는 EBR-I에 이어 공학적 실증을 위해 EBR-II (전기출력 20MWe)가 건설되었다. 이爐는 탱크형 Na냉각로로서 연료의 재처리, 재가공, 검사용 핫셀을 가지있는 폐쇄된 사이클시설로서의 특징을 갖고 있으며, 또 二重管型 증기발생기를 갖고 있는데 현재도 순조롭게 발전을 계속하고 있다.

같은 무렵 전기출력 65.9MWe의 엔리코·페르미爐가 건설되었으나 연료용융과 Na-水反應 등을 포함하여 귀중한 운전경험을 쌓고 1972년에 폐쇄되었다. 또 산화물연료 고유의 안전성으로서 負의 도플러係數를 검증하기 위해 서독과 공동으로 SEFOR을 건설했다. 이어서 고속중성자에 의한 照射를 목적으로 한 실험로 FFTF가 건설되어 현재도 순조로이 운전되고 있다. 그동안 원형로 크린치·리버(CRBR)가 건설 도중에 정치적문제로 중지되었다.

영국은 비교적 일찍부터 FBR 개발에 착수하고 있었는데 Dounreay에 건설된 실험로(DFR)는 냉각제에 Na를 사용하고 전자펌프에 의해 1차계통을 순환시키는 타입이었다. 그후 원형로 PFR(250MWe)을 건설했으나, 증기발생기에서

〈表 3〉 世界의 高速增殖炉開發

| 국 명 | 1955 | 1960 | 1965 | 1970 | 1975 | 1980 | 1985 |
|-------|-------|------------|------------|-----------|--------|---------|--------|
| 프 랑 스 | | 라프소디 着工 | 라프소디 閉鎖 | 피닉스 臨界 | 슈퍼피닉스 | | |
| 英 国 | DFR | | | PFR | | | |
| 西 独 | | | | KNK-I | KNK-II | SNR-300 | |
| 美 国 | EBR-1 | EBR-2 | 페르미 | SEFOR | FFTF | | |
| 蘇 聯 | | BR-5 | | BOR-60 | BR-10 | BN-350 | BN-600 |
| | | | | | | | BN-800 |
| 日 本 | | | | 常陽 | | | 몬주 |

자주 Na-水反應事故가 발생해 곤란을 겪기는 하였지만 20만MWD/T를 목표로 한 高燃燒度燃料의 개발 등 귀중한 운전실적은 높이 평가받고 있다.

프랑스는 미국, 영국 보다 약간 뒤늦게 1967년 실험로 라프소디를 임계시켰다. 연료로서 PuO₂-UO₂산화물을 당초부터 장전하는 등 착실한 성과를 올려 왔으나, 爐容器노즐에 문제가 있어서 1983년에 폐쇄되었다. 라프소디는 루프형이었으나, 次期原型爐 피닉스는 전기출력 250MWe로 탱크爐型이 채택되어 1973년 임계에 이르렀으며 현재도 순조로이 가동되고 있다.

이런 실적을 토대로 프랑스는 전기출력 1,200 MWe인 세계 최초의 본격적인 FBR에 의한 발전실증로 슈퍼피닉스(SPX)를 건설하여 전세계의 기대를 모았는데, 1985년 9월 임계에 도달했다. 그러나 1987년 사용후핵연료 저장탱크에 Na리크가 발생하여 복구작업이 진행되고 있다.

서독은 Na냉각의 熱中性子爐 KNK-I을 개조한 20MWe의 고속실험로 KNK-II를 보유하고 있지만, 원형로 SNR-300은 건설완료 후 주

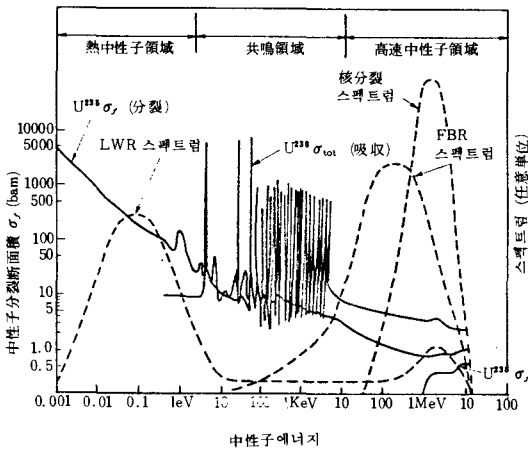
정부의 허가를 얻지 못해 임계에 이르지 못하는 상황이 계속되고 있다.

소련은 일찍부터 FBR 개발을 독자노선으로 착수하여 1969년에는 고속실험로 BOR-60, 1972년에 BN-350(루프型), 1980년에 BN-600(탱크型)을 운전개시하여 순조롭게 운전실적을 쌓고 있다. 또 次期爐 BN-800도 1987년 건설에 착수했다고 전해지고 있다.

그밖에 해외에서는 이탈리아가 실험로의 건설을 추진하였으나, 앞으로의 거취가 주목되고 있다. 또 인도는 炭化物燃料에 의한 고속실험로의 건설을 추진한 것은 매우 의의 깊은 일이다.

일본은 常陽이 매우 순조롭게 운전을 계속하고 있으며, 중요한 경험을 쌓고 있는 중이다. 원형로 몬주(전기출력 280MWe)의 건설도 순조로이 추진되어 1992년 10월의 임계를 목표로 하고 있다.

최근의 동향으로는 미국에서 중소형로 지향이 도모되어 간소화에 고유의 안전성을 부과한 모듈형 FBR로서 GE社의 PRISM을 중심으로 향후 개발하기로 되어 있다. 또 금속연료와 재처



(그림 2) FBR과 LWR의 中性子 스펙트럼과 核斷面積

리를 일체로하여 생각한 EBR-II에서 취해진 중래의 개념을 한층 높은 IFR(Integral Fast Reactor)의 개념이 전면에 나오게 되었다.

유럽에서는 프랑스의 슈퍼피닉스(SPX-1)의 다음으로 생각하고 있던 SPX-2(1,500MWe)로 할 것이나, 서독의 SNR-300의 次期爐 SNR-2로 할 것이나 하는 논의를 백지화시키고, 유럽 공동체인 EFRUG에서는 영국의 실증로 CDFR을 포함하여 최종적으로 EFR 1基로 좁혀 1990년대 초에 건설에 들어가려 하고 있으나, 영국·서독이 후퇴한 상황에 의해 예측할 수 없는 現狀이다.

3. 主要特性的 相異

LWR과 FBR 爐型的 특징을 정확히 표현하여 기술하면 전자는 열중성자·저농축우라늄·輕水減速·輕水冷却·轉換型原子爐이며, 후자는 고속중성자·高富化플루토늄·減速材無·액체금속냉각·증식형원자로로 구분된다. 표4의 주요특성과 아울러 LWR과 FBR의 핵특성·연료 특성·플랜트의 傳熱流動特性을 유추할 수 있다.

먼저, LWR과 FBR에서는 핵분열을 일으키는 核的 動作범위가 중성자스펙트럼에서 그림2에서 보듯이 크게 다르다. 천연우라늄을 농축시

켰다고는 해도 2~3%의 U^{235} 가 소량밖에 없는 경우로에서 핵분열에 의한 연쇄반응을 유효하게 일으키기 위해서는 핵분열에서 발생한 평균 1MeV 가까운 고속중성자를 먼저 물로 감속시켜 약 수백Barn이라는 분열확률이 높은 영역에서 반응시키는 것이 필요하다. 이 감속효과는 동시에 그림2에서 볼 수 있는 97~98%나 중성자를 흡수하여 반응을 저지하는 U^{238} 의 共鳴吸收領域을 단숨에 빠져나가 U^{238} 의 핵분열을 유휴화시키는 효과를 갖고 있다. 또 핵분열을 일으켰을 때 2차적으로 방출되는 고속중성자의 수도 열중성자에 의한 것 보다 많고, 또 U^{238} 보다도 Pu^{239} 쪽이 많다(LWR에서는 2.4, FBR에서는 2.8).

FBR에 대해 생각하면 分裂斷面積이 작은 고속중성자영역에서 핵분열을 일으키기 위해서는 플루토늄의 富化도를 20~30%로 10배 높일 수 있다면, U^{238} 의 핵분열도 기대할 수 있고, 또 노심구조물질의 흡수효과도 작으므로 LWR과 같은 핵분열연쇄반응을 기대할 수 있다.

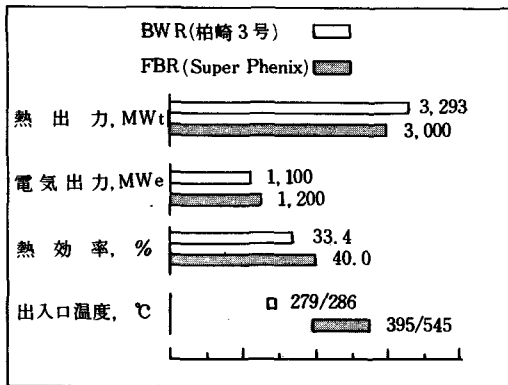
(表 4) LWR과 FBR의 主要特性比較

| 項 目 | LWR | FBR |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 中 性 子 | 熱中性子 ~0.1eV (平均) | 高速中性子 ~200keV (平均) |
| 2 核分裂斷面積 | 數 100 barn | 約數 barn |
| 3 燃料 濃縮度 被覆材 | U-235 低濃縮 2~3% Zr | Pu 高富化 20~30% SUS |
| 4 目標燃燒度 | 50,000MWD/T以上 | 200,000MWD/T |
| 5 블랭킷 | 無 | ^{238}U |
| 6 減 速 材 | 輕水 | 無 |
| 7 出力密度 | 30~100kW/l | ~300kW/l |
| 8 增 殖 比 | 約 0.6 (轉換比) | 約 1.2 |
| 9 運 轉 溫 度 | ~300°C | ~500°C |
| 10 出口, 入口溫度差 | ~30°C | 150°C |
| 11 冷却材 融 点 | 輕 水 0°C 100°C | 金屬나트륨 97.8°C 883°C |
| 12 原子炉容器壓力 | PWR 150 氣压 BWR 70 氣压 | 常 压 (輕 프트압出-10氣压) |
| 13 容 器 두 께 | 10~25cm | 2.5~5 cm |
| 14 構 造 材 | 炭 素 鋼 | SUS |

결국 고속중성자에 의한 연쇄반응에서는 핵분열에 의한 實效放出中性子が LWR보다 많고, 또 흡수효과에 의한 중성자의 손실이 적으므로 전체적으로 중성자가 남아 이 여분이 U^{238} 에 의해 Pu로 변화되어 운전하면서 연료가 증가한다는 증식성을 초래한다.

이상의 核的 성질에 의해 FBR쪽이 LWR에 비해 핵분열수가 대체로 한단위 많다. 즉 爐心에서의 발생열량이 큰 것을 나타내는 출력밀도도 표4에서 처럼 크고, 또한 운전온도도 FBR에서는 500°C 이상이 되어 원자로의 입구·출구의 온도차도 LWR이 10~30°C인 데 비해 FBR에서는 150°C로 크다. 때문에 FBR에서는 輕水로 열을 제거할 수 없고, 연료편을 가늘게 하여 열전달면적을 넓혀 열전도가 좋은 액체금속 Na를 사용해야 한다(감속효과로 고속중성자가 아니게 되는 점에서도 輕水는 사용불가). 그림3은 최근의 BWR과 FBR(슈퍼페닉스)의 열특성 상위를 도시한 것이다. 또 물의 비등점이 100°C이고 LWR의 운전온도가 약 300°C인 점을 감안하면, PWR에서 150기압, BWR에서 70기압 정도의 압력을 가해 除熱하여 증기조건을 조정해야 한다. 이것은 LWR은 원자로용기의 두께가 약 20cm로 두껍게 되는 것을 의미한다.

한편 FBR에서는 Na가 常壓의 경우 97.8°C에서 비등점 883°C까지 광범위에 걸쳐 액체라서 운전온도가 500°C에서도 비등하지 않기 때문에



(그림 3) BWR/FBR 플랜트 열특성

상압에서 사용할 수 있어 계통에 가해지는 압력은 수송에 관한 펌프吐出壓만으로 되어 원자로 용기는 얇은 구조(常陽2.5cm, 100만KW 약5cm)로 할 수 있다.

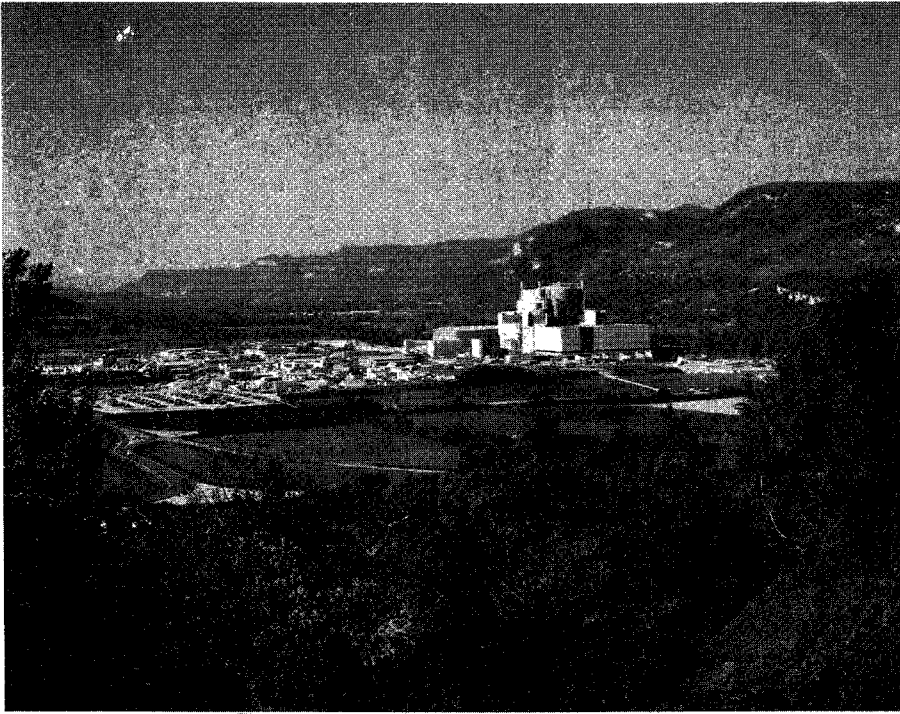
또한 FBR에서는 얇은 구조로 해야 할 사정이 있다. 이것은 출입구 온도차가 큰 점과 물에 비해 Na는 比熱이 적어 열전도가 큰 점에서 熱應力, 熱衝擊을 받기 쉽기 때문이다. 얇은 것은 제조상, 용접시공상 이점이 있으나 지진국인 일본에서는 LWR이 두꺼운 구조이므로 지진에 대해서 건전성을 유지하는데 반해, 얇은 구조로는 어려워진다. 때문에 FBR에서는 열하중과 耐震 기계하중의 양자를 고려한 두께의 최적화가 필요해진다. 이같이 FBR에서는 냉각재로 Na를 사용하는 것이 LWR과 다른 큰 특징이 있다.

나트륨의 장점으로는 액체로서의 온도범위가 넓고(100°C~880°C), 증기압도 작으므로 爐容器內壓力이 적어 유동성도 크다. 爐化學의 점에서 생각하면 Na는 單原子金屬으로서 물과 같이 구조재에 미치는 부패성이 없고, 또 방사선에 의해 解離되지도 않는다. 또 액체금속이기 때문에 전자펌프의 사용이 가능하다.

반대로 단점으로 생각되는 점도 많다. 먼저 Na는 불투명하므로 LWR에서는 노용기의 뚜껑을 열고 볼 수 있는 상태에서 연료를 교환할 수 있는 데 반해, 커버그로서 Ar에서 홀드되어 밀폐된 연료교환계통 속에서의 이동을 포함해 원격조작하여야 하므로 精度가 높은 사양이 요구된다. 또한 사용후핵연료를 풀에 저장하기 전 단계에서 부착된 Na를 세정하는 등의 처리가 필요하다.

Na는 열수송중 배관재료에 대해 脫炭, 浸炭 등의 작용이 부가되거나, 또 방사화되어 Na^{24} , Na^{22} 등이 생성된다.

가장 중요한 것은 물과 화학적 親和性이 높은 것이다. 특히, 증기발생기에 대해서는 전열관에서 물과 Na가 인접해 있으므로 Na-水反應이라는 급격한 반응에 관해 R&D가 계속되어 특별한 안전상의 연구가 플랜트에 대해 배려되고 있다.



◀ 프랑스의 고속중성자 실증로 Superphenix 전경.

爐心·燃料에 대해서 FBR은 LWR에 비해 농축도가 높으며, 발전량이 많으므로 연료펠렛의 치수가 제열을 위해 보다 세분화되어 있다. 또 高速中性子로 노심연료의 被覆管材料를 두들겨 더 고온이 되기 때문에 LWR에 비해 크리프가 심하다. LWR의 燃燒度가 현재 최고목표 5만 MWD/T인데 반해, FBR에서는 상업화로서 20만 MWD/T를 목표로 개량형 장수명연료가 개발 중이다. FBR의 피복재는 SUS인데 반해, LWR은 지르코늄이다. 이같이 피복재 및 구조재료에 대해서는 고온구조설계지침, 안전기준 등의 규격·기준의 작성에 보다 많은 노력을 기울이고 있다.

FBR은 고온에서 팽창률이 큰 스테인레스강을 구조재료로 배관, 기기에 선택하고 있기 때문에 운전, 정지에 따른 배관의 신축을 통해서 응력을 완화시키므로 配管이 길어져 보통 탄소강 배관으로 끝나는 LWR에 비해 이 배관단축 기술이 중요해진다.

안전성의 관점에서 말하면 LWR에서는 배관

파열이 발생했을 경우 고압의 노심에 공급될 물이 없어지기 때문에 긴급노심냉각설비(ECCS)가 준비되어 있으나, FBR에서는 저압이라서 ECCS는 설비되어 있지 않다. 다만 붕괴열제거를 자연순환에 의해 제거할 수 있도록 설계되어 있고, 이 때문에 노용기는 이중용기가 되고, 또 배관의 높이를 연구하는 등 Na의 누수시에도 충분히 爐容器液面이 확보되도록 설계되어 있다.

計測制御에 대해서는 FBR에서도 고속중성자를 흑연 등으로 熱中性子로서 검출기를 작동시키고 있으므로 본질적으로는 변함이 없다. FBR은 遲發中性子 발생을 β 값가 적으나, LWR과 같이 제어봉에는 B,C 등의 吸收材를 사용하고 있다. 고속중성자는 열중성자에 비해 自由行程이 길기 때문에 LWR(BWR)에서는 연료집합체 4體에 하나 十字의 제어봉이 배치되어 있으나, FBR에서는 10개의 집합체에 대해 하나 정도 배치되어 있고, 爐動特性으로 안정되어 있다고 할 수 있다. LWR에서는 응력부식균열 외의 배관,

〈表 5〉 最新의 BWR, PWR, FBR의 特性比較

| 플랜트 仕 様 | BWR (柏崎 3号) | PWR (大飯 3号) | FBR (Super Phenix) |
|---|--|---|---------------------------|
| 1. 出力 熱出力 MWt 電氣出力 MWe | 3, 293 1, 100 | 3, 423 1, 183 | 3, 000 1, 200 |
| 2. 熱効率 % | 33. 4 | 34. 6 | 40. 0 |
| 3. 冷却材 入口溫度 ℃ 出口溫度 ℃ 運轉圧力 kg/cm ² 1次冷却材量 T | 279 286 70. 7 289 (原子炉와再 循環系) | 289 325 157 351m ³ (定格出力時) | 395 545 — 3, 500 |
| 4. 炉 心 높 이 m 出力密度 kW/t | 3. 71 50. 1 | 3. 66(有効) 105 | 5. 4 285 |
| 5. 燃 料 燃焼度(平衡)MWD/T 集集体数 本 燃料棒外径 mm | 33, 000 764 12. 3 | 32, 000 193 9. 5 | 100, 000 233 8. 5 |
| 6. 制御棒 本 数 体 駆動方式 — | 185 水圧駆動 | 53 磁気재크 | 21 重力落下 |
| 7. 蒸氣發生器 型 式 管 材 質 | — — | 새울경우 U 字管式 니켈, 크롬 鉄合金 | 貫流해리칼 인크로이 800 |
| 8. 格結容器 型 式 設計圧力 kg/cm ² 크 기 内徑 m 全高 m | 圧力抑制型 3. 16 29 48 | 上部半球円 筒型 4 43 65 | 돔/가드베 셀 3 |

구조재의 건전성을 확보하고, 또 연료파손의 유무를 감시하기 때문에 爐水分析이 엄격한데, FBR에서도 Na純度 관리는 엄격하게 시행되고 있다. FBR에서 특수한 것으로는 Na가 100℃ 이하에서 응고하므로 운전정지중이라 해도 전체의 온도감시는 중요하며, 또 초기 起動時에는 플랜트 전체를 예열할 필요가 있고, 이들 히터, 온도감시계, 각종 신호 등 計測線은 LWR 보다 길어진다.

FBR은 LWR에서 생성되고 재처리공장에서 추출된 플루토늄과 농축공장에서 폐품으로 배출되는 劣化우라늄, 또는 천연우라늄을 사용하여

노심연료 및 블랭킷 연료를 제조하므로 LWR만 운전할 경우에 비해 채광량이 매우 적어진다. 또 증식에 의해 새로운 잉여의 플루토늄이 생성되므로 연료가 되는 플루토늄의 공급이 용이해진다. 핵연료사이클의 각 프로세스는 LWR과 기술적으로 큰차이는 없으나, FBR은 우라늄 농축의 공정을 필요로 하지 않고 플루토늄을 劣化우라늄에 섞음으로써 高富化의 연료를 얻을 수 있는 이점이 있다. LWR에 있어서 이용가치가 없는, 말하자면 폐물·폐품을 회수하여 그것을 유효하게 이용할 수 있는 점에 특징이 있다고 할 수 있다.

이상 LWR과 FBR의 주요한 특성의 차이를 보아 왔는데, 마지막으로 최신 BWR(柏崎 3호)과 PWR(大飯 3호) 및 FBR(슈퍼피닉스)의 설계사양을 비교하여 표5에 나타내었다. 이 표에서 1차냉각재의 量이 탱크형 FBR의 경우 LWR에 비해 한 단위 많은 점, 연료의 연소도가 FBR이 3배 정도 높은 점, 제어봉 구동방식이 BWR, PWR, FBR에서 특징적으로 상위한 점 등을 알 수 있다.

5. 結 論

LWR과 FBR의 기술적 과제의 상위를 부각시킬 목적으로 각기의 개발경위와 특성의 비교를 해 보았다. LWR은 순조롭게 개발이 진행되어 온 데 대해 FBR은 그 착수가 빨랐음에도 불구하고 고난의 길을 걷고 있음을 알 수 있다. 그 원인은 역시 FBR이 LWR과 경합하기에는 아직 기술적 개발요소가 많아 경제성이 맞지 않는 점이 최대의 이유라고 생각된다.

그러나 FBR의 증기발생기·水系統은 LWR과 똑같은 기술분야이기 때문에 의외로 경시되어 상호의 기술분야가 유사한 점을 있어 경험이 살려지지 못한 채로 되어 있는 점도 있다.

이런 점에 대해서는 앞으로 세심하게 검토개선택되어 갈 것으로 기대된다.