

## 蘇聯의 原子力開發과 VVER型原電

### 蘇聯의 原子力發電 開發

『지난 4월 26일 발생한 蘇聯 체르노빌 原子力發電所 事故로 全世界의 관심을 集中시켰던 蘇聯의 黑鉛채널型爐(RBMK)에 對하여서는 自由世界에 事故內容과 設備現況이 隨時로 報道된 바 있으나, 蘇聯에는 RBMK型과 같이 雙壁을 이루고 있는 爐型의 하나로 蘇聯이 獨自的으로 開發하여 商用化하고 있는 加壓水型爐(VVER)가 있다.

체르노빌原電 事故後 蘇聯의 原子力利用國家委員會 副議長은 “앞으로 蘇聯은 PWR 開發에 注力하겠다”고 發表한 바 있어, 現在 建設 및 計劃中인 VVER型이 將次 主動力爐가 될 것으로 豫想되며 RBMK型에서 VVER型으로 轉換될 것으로 생각된다.

最近의 報道에 의하면 蘇聯이 北韓에 總設備容量 176萬KW의 原子力發電設備을 供給한다고 하여 國內 原子力界에 至大한 관심을 불러일으키고 있는데, 現在까지 蘇聯이 衛星國家에 供給한 發電爐가 大部分 VVER-440型이며, 北韓의 電力設備容量으로 보아 單基容量 44萬KW가 技術的으로 最適이고 또한 蘇聯이 技術自立이 된 爐型이란 點 등으로 蘇聯이 北韓에 供給할 原子爐는 VVER-440型 4基가 될 可能性이 가장 크다고 推定되므로 이번엔 特輯으로 VVER 型 爐에 관한 資料의 아울러 蘇聯 및 衛星國家들의 原子力開發 實情을 整理 紹介한다.

蘇聯은 1954年 6月 Moscow郊外의 Obninsk에서 世界最初의 原子力發電所(電氣出力 6,000 KW)가 送電을 開始하였으며, 그후 積極적인 原子力開發이 進行되어 現在는 世界에서 세번째의 原子力發電設備을 保有하고 있는 나라가 되었다. 소련의 에너지資源은 約80%가 開發이 늦어지고 있는 東部地域에 偏在되어 있다.

한편, 人口의 75%는 유럽·러시아地方에 集中되어 있어서 電力의 소비도 이 地域에 偏重되고 있다. 燃料의 約20%가 發電用으로 使用되고 있으며, 電力消費量은 年 約4%씩 伸長하고 있다.

1984年の 總發電電力量은 1兆4,930億KWH인데 이중 原子力이 1,420億KWH(約10%)를 공급하였다. 1986년부터 시작되는 第12次 5個年計劃에 의하면 1990年の 總發電電力量은 1兆8,400億~1兆8,800億KWH이며, 이중 原子力發電이 3,900億KWH(約21%)로 되어 있다. 1984年에서 1990年까지의 年平均伸長率을 보면 電力全體의 경우 3.5~3.9%이나 原子力에 대해서는 年平均伸長率이 18.3%로서 期待가 크다.

즉, 第12次 5個年計劃에서는 火力發電所에서 重油를 使用하는 것을 대폭 削減함으로써 電力構成의 加一層 改善을 도모하기 위해 유럽·러시아地域 및 우랄地方에 大容量 原子力發電所 建設을 추진하기로 하고 있다. 그리고 이計劃의 달성을 위해 80萬KW級의 高速增殖爐시리즈

〈表 1〉  
제12차 5개년 계획의  
에너지 계획

種別 \ 年	第12次 5 個年計劃 1990年 (生産計劃)	1984年 (實績)	1990/1984 (年平均伸長率%)	第11次 5 個年計劃 1985年 (當初目標)
電力 10億kWh	1,840~1,880	1,493	3.5~3.9	1,550~1,600
이중 原子力	390	142	18.3	220~225
石油 100萬t	630~640	613	0.5~0.7	620~645
가스 10億m <sup>3</sup>	835~850	587	6.0~6.4	600~640
石炭 100萬t	780~800	712	1.7~2.0	770~800

(1985年12月31日)

〈表 2〉  
소련의  
原子力發電

	加壓水型輕水爐	黑鉛減速輕水冷却爐		高速增殖爐	合 計
		沸騰水型	加壓水型		
運轉中	18基	14基	8基	2基	43基*
	1,097.5萬kW	1,540萬kW	90萬kW	75萬kW	2,719.5萬kW
建設中	27基	8基	—	—	35基
	2,700萬kW	950萬kW			3,650萬kW
計劃中	27基	7基	—	—	34基
	2,700萬kW	900萬kW			3,600萬kW

\* 沸騰水型爐 1基(7萬kW) 포함

의 建設 및 160萬KW級의 高速增殖爐, 150萬KW級 原子力發電所의 技術上의 問題를 해결하는 것이 課題로 되어 있다.

蘇聯은 Obninsk原子力發電所를 稼動시킨 以後 몇가지의 發電爐 開發에 착수하여, 1960年代 中반에 黑鉛減速輕水冷却爐沸騰水型(RBM-K)과 美國型의 加壓水型(PWR)에 類似한 加壓水型爐(VVER)를 主體로 하여 開發한다는 方向을 설정하였다.

소련의 原子力發電所 建設計劃을 보면 RBMK와 VVER을 거의 같은 數로 建設하기로 되어 있는데, RBMK型이 商用化 面에서 한발 앞서 있으며 또한 1985年12月 現在 運轉中인 VVER의 設備容量이 約1,100萬KW인데 대해서 RBMK는 1,540萬KW의 設備容量을 갖고 있다. 이것은 RBMK型의 경우가 單基容量을 100萬KW의 규모로 증가시키는 것이 쉬운데 由來한다.

現在 100萬KW의 VVER標準型이 實用化되었으며, 이것은 最近의 150萬KW RBMK에 충분히 對應할 수 있으리라 생각된다(建設中인 VVER의 建設容量이 2,700萬KW인데 대해 RB-

MK는 950萬KW). 또 앞으로의 大出力爐로서 240萬KW의 RBM-KP2400이라는 爐型의 計劃도 추진되고 있다.

高速增殖爐에 대해서는 BR-1以後, 液體金屬(나트륨)冷却高速增殖爐로 進行되고 있는데 現在 2基의 原子爐가 運轉中에 있다.

現在 소련에서 實際의 發電用原子爐로 建設되고 있는 爐型은 黑鉛減速輕水冷却爐沸騰水型(RBMK)외에 輕水爐의 加壓水型(VVER) 및 沸騰水型(BWR)이며, 高速增殖爐에서는 나트륨冷却高速增殖爐이다. 이중 沸騰水型은 小型爐가 1基 運轉되고 있을 뿐이므로 나머지 3爐型이 主流가 된다.

다음은 各各의 爐型에 대한 說明이다.

#### (1) 黑鉛減速輕水冷却爐加壓水型

소련에서는 原子力의 개발초기부터 黑鉛減速輕水冷却爐가 獨自의 開發되어 왔다. 이 原子爐는 減速材인 黑鉛블록을 貫通하는 多數의 채널(壓力管)이 있고, 冷却材로서 輕水(普通의 물)를 使用한다.

〈表3〉 黑鉛減速輕水冷却爐沸騰水型(RBMK)의 運轉中、  
建設中 및 設計中 諸元

諸 元	爐 型	RBMK -1000	RBMK -1500	RBM-KP -2400
電 氣 出 力	萬kW	100	150	240
熱 出 力	萬kW	320	480	650
蒸 氣 容 量	t/h	5,800	8,800	9,600
터빈入口에서의 蒸氣파라미터 :				
蒸 氣 壓,	kg/cm <sup>2</sup>	65	65	65
溫 度,	℃	280	280	450
爐 心 크 기: m				
높 이		7.0	7.0	7.0
直 徑		11.8	11.8	7.5×27
채널 數:				
蒸 發 用		1,693	1,661	1,920
過 熱 用		—	—	960
우라늄裝填	t	192	189	293
채널에서 交替한 우라늄의 平均燃燒度, MWD/kg				
蒸氣채널에서 交替한 것		18.1	18.1	19.4
過熱채널에서 交替한 것		—	—	18.1

이 型의 原子爐가 開發된 큰 이유는 出力의 大型化가 용이하다는 것과 運轉中에 各各의 채널마다 燃料交換을 할 수 있어서 稼動率의 向上에 기여한다는 것이다. 各 채널은 통일된 標準構造의 機器를 增加시키는 것이 가능하여 機器의 製造面에서 出力의 大型化에 對應하기가 쉽다.

安全面에 대해서는 循環水路에 다수의 壓力管을 채용함으로써 冷却材의 全容量을 적게 할 수가 있고, 出力의 증가에 따르는 安全性을 확보하는 것이 용이하다고 한다. 더욱이 原子爐內의 各 壓力管에는 여러가지 종류의 燃料를 배치하는 것이 가능하다. 例컨대 2산화우라늄과 금속우라늄의 연료를 組合시켜 사용할 수 있으며, 우라늄-플루토늄燃料사이클 및 우라늄-토륨燃料사이클로도 비교적 쉽게 轉換할 수 있다고 한다.

소련에서 最初인 Obninsk原子力發電所는 현재의 黑鉛減速輕水冷却爐의 原型이었다. 이 發電爐에는 우라늄-235의 濃縮度가 5%인 燃料가 사용되었다. 天然우라늄을 연료로 하는 것

이 有利했으나, 技術的으로 곤란해서 低濃縮우라늄이 사용되었다. 그리고 이 發電의 성공으로 原子力의 平和的인 에너지利用을 가능하게 했을 뿐만 아니라 부분적인 燃料의 交換, 平行으로 배치된 壓力管시스템에서의 증기의 加熱, 黑鉛블록의 高温에서의 사용 등을 實證했다.

이어서 1958년에 Siberia原子力發電所 1號機(出力 10萬KW)가 운전에 들어갔다. 이 爐는 使用後核燃料를 遠隔操作으로 交替하는 設備를 갖고 있으며 플루토늄生産時的 廢熱을 發電에 이용하는 한 例라고 할 수 있다. 이와 같은 종류의 원자력발전소의 주된 비용은 생산된 플루토늄의 값으로 충당되었다. 이것은 原子爐에서 原子爆彈用 플루토늄의 생산을 示唆하고 있다.

1964年 4月 Beloyarsk原子力發電所 1號機(出力 10萬KW)가 送電을 開始했다. 이 爐는 黑鉛減速輕水冷却爐의 加壓水型이라고 불려지고 있으며, Obninsk原子爐의 改良型으로서 商用規模의 최초의 發電爐였다. 이 1호기는 出力이 작고 壓力管이나 배관의 구조가 복잡하기 때문에 당시의 發電코스트는 우랄地方의 火力發電所보

다 비쌌다. 그래서 2호기는 設備가 소형이 되도록 개량되었다.

Beloyarsk 1, 2號機에서 특징은 「核過熱方式」이라고 불리는 방식이 채용된 것이다. 原子爐內的 壓力管에서 加熱된 물과 증기가 섞인 것이 氣水分離器로 보내져서 증기부분만이 分離된다.

여기서 分離된 증기가 다시 원자로내의 過熱켄널이라고 하는 壓力管내에서 가열되어 約 90 氣壓 510~520℃의 증기가 되어 직접 터빈으로 보내진다. 이런 방식은 소련밖에 없는 방식이다.

이와 같은 核過熱方式에 대해 「飽和蒸氣發生方式」이 있다. 이것이 Chernobyl原子力發電所に 채용되고 있는 방식이다. 원자로 내에서 발생한 증기는 氣水分離器에서 분리되어 再加熱됨이 없이 터빈으로 보내진다.

上記의 원자로 운전경험에서 黑鉛減速輕水冷却爐는 大容量의 發電爐에서 사용하는 것이 경제적이란 展望이 얻어졌다.

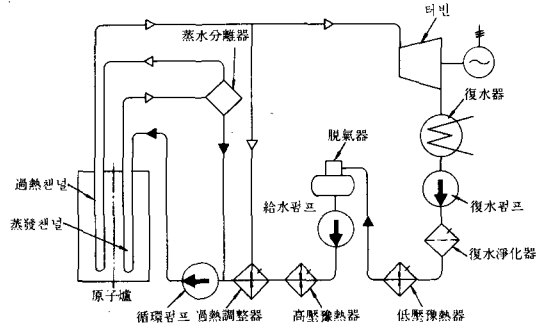
## (2) 黑鉛減速輕水冷却沸騰水型(RBMK)

RBMK는 소련이 獨自적으로 개발한 대형의 發電爐로서 原子爐內에 배치된 많은 壓力管에서 증기를 발생시키는 켄널型이기 때문에 운전중에 燃料交換을 할 수 있으며, 높은 設備利用率을 유지할 수 있는 특징이 있다. 이것은 大型壓力容器나 蒸氣發生器의 제작을 필요로 하지 않는 利點이 있으나, 逆으로 켄널型이기 때문에 시스템이 복잡하고 大型이 된다는 缺點이 있다.

1973년에 Leningrad原子力發電所 1號機(出力 100萬KW)가 送電을 개시하였다. 이 爐가 RBMK-1000시리즈의 최초의 것이다. 이 시리즈에서는 原子爐가 모두 통일된 標準構造의 機器를 사용하고 있다.

Leningrad 1·2號機의 운전경험에서 설계의 일부를 개량할 필요가 생겼으며, 신뢰성과 경제

〈그림 1〉 過熱蒸氣方式의 흐름圖



성을 향상시키기 위한 변경이 지적되어 그 후의 RBMK-1000에 반영되었다. 이것은 우라늄과 흑연의 비가 원자로의 過熱制御에 대처하기에 완전치 못하기 때문에 그 후의 RBMK-1000에서는 最良의 비율로 수정되어 原子爐 爐心の 出力分布의 自動制御裝置가 갖추어졌다.

또 Leningrad 原子力發電所の 운전 경험에서 특히 循環펌프, 흑연감속재 온도 등에 여유가 있다는 것을 알게 되어 RBMK-1000시리즈를 더욱 발전시켜 出力 150萬KW의 RBMK-1500시리즈가 개발되게 되었다.

1985년 12月末 現在 出力 100萬KW의 RBMK-1000시리즈는 Leningrad외에 Chernobyl에 4基, Kursk에 3基, Smolensk에 2基를 각각 운전중이다. 또 세계최대출력인 150萬KW의 RBMK-1500시리즈는 Ignalina에서 1基가 운전중에 있다.

## (3) 加壓水型輕水爐(VVER)

黑鉛減速輕水冷却爐에 이어서 獨自적으로開發을 추진하고 있는 것이 VVER이다. VVER은 減速材와 冷却材에 보통의 물(輕水)을 사용하여 세계의 주류인 輕水爐의 加壓水型爐(PWR)의 구조 및 설계와 유사하다. VVER은 蘇聯國內 뿐만 아니라 소련의 원조로 원자력개발을 추진하고 있는 東歐諸國에서도 주요한 원자로로 되어가고 있으며, 1985년 12月末 現在 소련에서는 17基의 VVER이 운전중이고 22基가 건설중

〈表 4〉 VVER 爐의 特性

파 라 미 터	VVER-210	VVER-365	VVER-440	VVER-1000
電氣出力 MW	3*×70	5×73	2×220	2×500
熱 出力 MW	760	1,320	1,375	3,000
効 率 %	27.6	27.6	32	33
터빈入口蒸氣壓力, 氣壓	29	29	44	60
1次系壓力, 氣壓	100	105	125	160
루 프 數	6	8	6	4
原子爐通過水量 m <sup>3</sup> /時	36,500	49,500	39,000	76,000
原子爐出口蒸氣溫度 °C	250	250	269	289
原子爐內平均余熱 °C	19	25	31	35
爐 心				
直徑 m	2.88	2.88	2.88	3.12
높이 m	2.50	2.50	2.50	3.50
燃料카세트數	343	349	349	151
燃料要素支持棒直徑 mm	10.2	9.1	9.1	9.1
카세트支持棒數	90	126	126	331
格子 피치 mm	14.3	12.2	12.2	12.6
우라늄裝填量 t	38	40	42	66

\* 터빈數

이다.

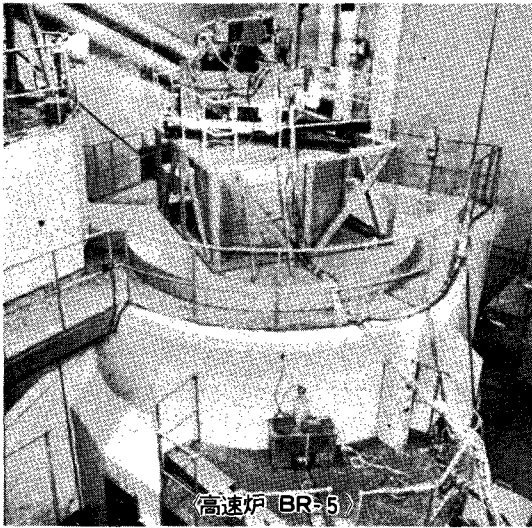
開發經緯를 보면 1964年 9月에 Novo Voronezh原子力發電所 1號機(出力 21萬kW)가 운전을 개시하였다. 設備利用率은 당시의 최신식 석탄 화력발전소와 충분히 경합할 수 있는 것이었으나, 유럽·러시아地域의 석탄화력발전소보다는 비싼 편이었다. Novo Voronezh원자력발전소 1호기는 VVER의 運轉信賴性 및 安全性을 입증함과 동시에 운전원의 운전기술 향상을 주목적으로 하고 있었기 때문에 과잉의 시설이나 안전설비를 위해 발전코스트가 상승했다고 한다.

이에 대해 1969年12월에 운전에 들어간 2號機(出力 36萬5,000KW)는 1호기의 原子爐壓力容器와 爐心の 크기가 거의 같으면서도 거의 2배의 出力增加를 나타냈다. 그것은 熱回路의 改良, 爐心 出力分布의 平坦化, 爐心內에서의 냉각재 가열 증가 등의 개선에 의한 것이다. 이로 인해 1호기에 비해 발전코스트는 40% 인하되었다. Novo Voronezh원자력발전소는 1971년과 1972년에 계속해서 3·4號機(出力 44萬KW×2)

가 운전을 개시하여 당시 歐洲最大의 원자력발전소가 되었다. Novo Voronezh원자력발전소의 운전성과는 이 나라의 석탄화력발전소에 대해서도 충분한 경쟁력을 갖는다는 것을 입증했다.

그후 보다 높은 出力의 VVER로의 移行이 행해졌다. 설계와 제작기술의 개량에 의해서 原子爐壓力容器內의 압력 상승과 효율의 향상이 행해져서 주설비의 대형화와 아울러 원자력발전소의 경제성을 높이고 있다. 出力 100萬KW의 VVER-1000시리즈에서는 붕소를 사용한 원자로의 제어와 연료집합체의 개량 등의 결과, 爐心の 出力密度가 상승했다. 또 고성능펌프의 채용과 1차계통 주요설비의 용량이 증대되었기 때문에 더욱 높은 蒸氣條件에서 작동하는 터빈설비가 사용되고 있다.

1985年12月 現在 Novo Voronezh 3·4호기 외에 出力 44萬KW의 VVER-440시리즈는 Kola에 4基, Rovno에 2基, Armenia에 2基가 운전중이다. 특히, Armenia에서는 地震이 많은 地域에 처음으로 건설되어 耐震性을 실증했다고 한다.



또 出力 100萬KW의 VVER-1000은 Novo Voronezh 5호기를 위시하여 Kalinin에 1基, Nikolayev에 2基, Zaporozhe에 2基가 운전중에 있다.

#### (4) 高速增殖爐

黑鉛減速輕水冷却爐(RBMK) 및 加壓水型輕水爐(VVER)는 當分間 발전용 원자로의 중심이 된다. 그러나 이들 원자로는 우라늄 자원을 합리적, 생산적으로 이용하고 있지 않다고 해서 高速增殖爐의 개발도 병행해서 추진되고 있다. 고속증식로는 減速材를 사용하지 않기 때문에 核分裂에서 발생하는 중성자를 효율적으로 이용해서 核燃料로 사용할 수 있는 플루토늄의 생산을 비약적으로 증가시킬 수가 있다.

1969년에 Dimitrovgrad市에서 高速增殖爐의 實驗爐 BOR-60(出力 60萬KW)이 發電에 성공했다. 1973년에 Shevchenko市에서 高速中性子爐 BN-350(出力 35萬KW)에 의한 海水의 淡水化와 發電에 성공하였다(이 爐는 바닷물에서 하루 12단톤의 淡水를 제조하는 것이 가능하다). 이들 고속증식로의 운전경험에서 BN-600(出力 60萬KW)이 Beloyarsk원자력발전소 3호기로 건설되어 1980年 4월에 송전을 개시했다. BN-600

원자로의 구조는 BOR-60이나 BN-350이 루프 타입에 대해 탱크타입이 채용되고 있다.

탱크타입이란 원자로의 爐心과 1차계통의 主要設備(熱交換器, 펌프등)를 대형의 圓筒型 탱크 容器內에 배치하는 구조이다. 이 탱크타입은 앞으로 계획이 진행되고 있는 BN-1600(出力 160萬KW)에서도 채용될 예정이다.

#### (5) 電力·熱併給用原子爐

소련에서 원자력발전소에서 발생하는 熱을 직접 주택이나 공장용으로 이용할 수 있는가는 중요한 課題이다. 특히, 1970年度 후반부터 이 문제에 대한 활동이 광범해지고 있다.

1976년부터 Bilibino원자력발전소가 세계에서 최초로 電氣와 地域暖房用 蒸氣를 공급했다. 이 원자력발전소의 원자로는 초기에 개발된 黑鉛減速經水冷却爐의 加壓水型이다. 이 원자력발전소는 出力이 작고, 發電코스트가 비교적 비싸다. 지역용 디젤발전소의 발전코스트 보다는 싸서 약 4분의 1이었다고 한다. 이것은 먼곳에 석유를 수송한다는 것이 더욱 경비를 증가시키기 때문이다. 주택의 난방에 사용되는 熱供給의 물은 主加熱器로 미리 가열되며, 주가열기는 터빈의 抽氣口로 부터 증기를 얻는 구조로 되어 있다.

소련에서는 현재 爐型에 관계없이 Leningrad, Kursk, Chernobyl, Kola, Beloyarsk 원자력발전소에서도 熱併給을 하고 있다. 또 熱供給專用原子爐(熱出力 50萬KW級)가 50만명 도시인 고리키 및 보로네지에 완성될 예정이다.

#### (6) 沸騰水型輕水爐(VK-50)

沸騰水型輕水爐(VK-50)는 현재 1基가 Dimitrovgrad市에서 發電하고 있다. 出力은 당초 5萬KW였던 것이 약간의 개량을 가해서 7萬KW까지 증가하였다. 두번째 基의 구체적인 계획은 발표되고 있지 않다.