

프랑스 原子力發電所의 運轉經驗

프랑스는 '89년 5월 현재 292原子爐·年の 900MWe 및 1,300MWe PWR原電의 운전경험을 축적하고 있으며, 이 경험을 분석함으로써 設備의 信賴性을 향상시킬 수 있다. 다음은 프랑스原子力廠(EdF)의 Par Lucien Bertron氏와 Daniel Glorian氏가 RGN誌에 발표한 내용이다.

1. 序 言

발전소의 성능, 특히 에너지를 생산하는 능력이 발전계통의 형태를 선택하는데 결정적인 요소중에 하나이다. 프랑스에서는 900MWe용량과 1,300MWe용량 가압경수로형 발전소의 그동안 운전경험(1989년 5월 1일 현재 292원자로·년)을 분석함으로써 설비의 신뢰성에 관해 좋은 아이디어를 얻을 수 있다. 폭넓은 운전경험자료를 바탕으로 프랑스 원자력계획의 초창기에 내놓은 운전상 가정사항들이 실제의 운전조건하에서 입증되는지를 점검할 수 있다.

물론 이들 자료는 지속적인 경험을 포함시키기 위해 개정되어야 하는데, 특히 7년반의 운전경험이 있는 900MWe급 발전소에 비하여 2년반의 운전경험밖에 없는 1,300MWe 발전소의 운전경험을 계속 반영하여야 한다.

本稿의 자료는 900MWe 및 1,300MWe 발전소의 운전결과에 대하여 세가지의 상이한 관점

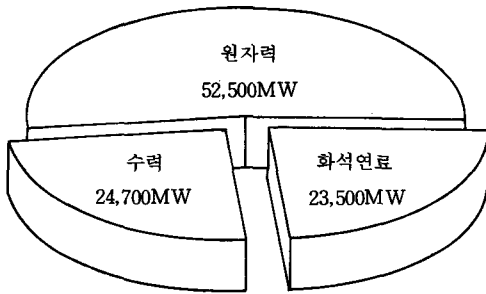
(연간, 누계 및 동절기 동안의 실적)에서 세부적으로 검토한 것이다.

2. 프랑스 原子力發電所 現況

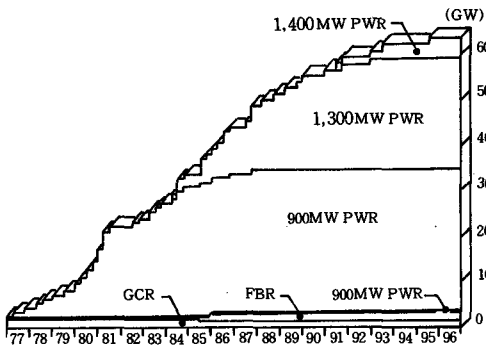
1989년 1월 1일 현재 프랑스 원자력발전소는 55기 발전소에 시설용량은 52,500MWe이다(그림1 참조).

- 4기의 가스냉각로 : 1,740MWe
- 2기의 고속증식로 : 1,433MWe
- 1기의 305MWe 가압경수로 :
305MWe
- 34기의 900MWe 가압경수로 :
30,620MWe
- 14기의 1,300MWe 가압경수로 :
18,490MWe

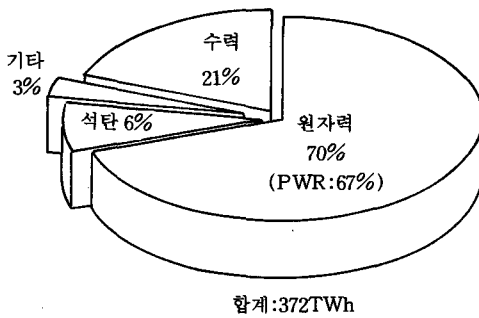
1977년 이후 원자력발전 시설용량의 증가 추세와 1996년까지의 운전개시 발전소의 전망을 그림2에 표시했다.



〈그림 1〉 프랑스 발전시설용량(89년 1월 현재)



〈그림 2〉 프랑스 원자력발전소 시설용량



〈그림 3〉 '88년도 프랑스 전력 생산량

원자력발전소는 프랑스 발전설비의 대부분을 차지하고 있으며, 전체 원자력시설용량중 95%가 48기의 900MWe 및 1,300MWe 용량의 가압경수로형 발전소로서 프랑스 전력계통의 근간을 이루고 있다.

프랑스의 1988년도 총 발전량은 372TWh이며, 이 중 70%인 260TWh가 원자력발전량이다 (그림3 참조). 이 260TWh중에서 95%(248 TWh)가 900MWe 및 1,300MWe 가압경수로

형 발전소에서 생산되었다. 다시 말하면 프랑스의 전체 전력생산량중 2/3 이상이 이들 원자력 발전소에서 생산되었다.

원자력발전추세를 보면, 최초의 900MWe 발전소인 Fessenheim 1호기가 계통에 연결된 1977년에 원자력발전량은 전체의 8%에 불과하였다. 그후 프랑스 전력생산량중 원자력발전량의 점유율은 70~75% 사이에서 안정되게 유지되고 있으며, 적어도 금세기 말까지는 현재의 수준이 유지될 것으로 보인다.

원자력발전의 압도적인 점유로 인하여 지난 몇년 동안은 원자력발전이 기저부하로서의 제 기능을 발휘하지 못했는데, 이는 가압경수로형 발전소가 최대시설용량으로 발전하지 못했음을 의미한다. 다시 말하면, 수요 보다 공급이 많을 경우에는 부하운전이나 예비상태로 정지해 있을 때도 있었음을 뜻한다. 따라서 900MWe 및 1,300MWe 가압경수로형 발전소에 의해 공급된 전력은 이들 발전소의 시설용량의 79%에 불과하였다.

3. 發電所性能의 尺度

3.1 定 義

발전소의 운전성능은 세가지 형태의 사건 또는 상황에 의해 제한을 받는다.

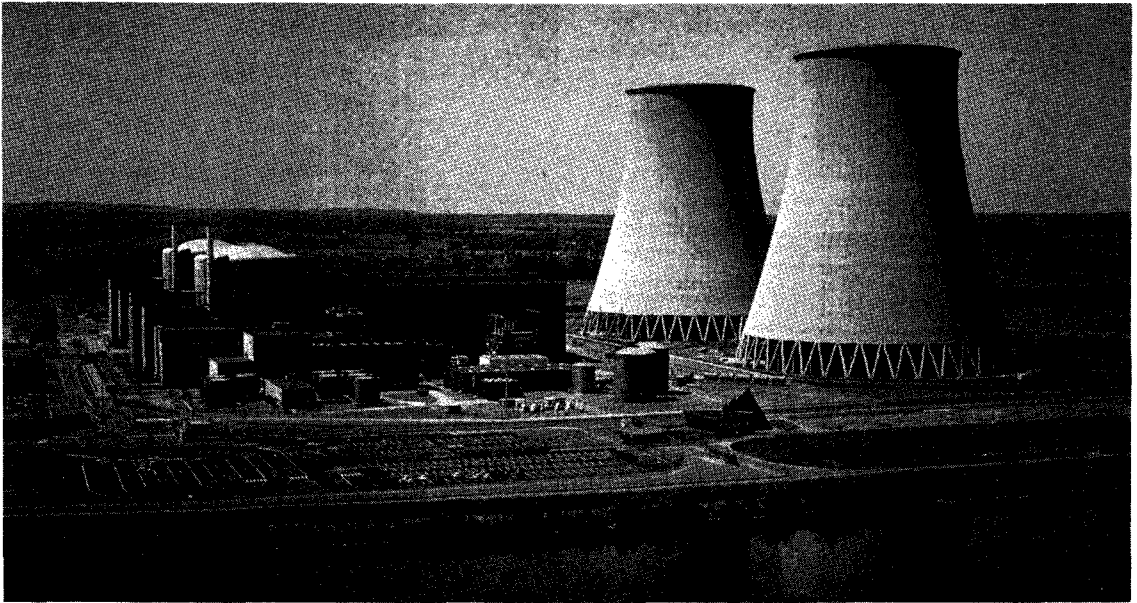
가. 고장 (Incidents)

비계획적이며 예상외의 고장으로 인해 설비의 생산능력이 전체적으로 또는 부분적으로 제한받는다. 그래서 프랑스는 적절히 계획된 보수정책을 시행함으로써 고장전수의 감소 및 그의 영향을 줄이는데 노력을 경주하고 있다.

나. 연료재장전 (Refueling)

연료의 연소로 인하여 연료재장전을 위해 발전을 정지하며, 일반적으로 1년마다 5~8주가 소요된다. 이 기간동안 발전설비에 대한 보수작업이 실시되는 이점이 있다.

시험이나 추가적인 보수작업을 위해 4주 전



▲Belleville 원자력발전소 전경

에 미리 계획된 모든 정지는 “계획” 발전정지로 간주된다.

다. 외부요인(External Factors)

운전상태에 있는 발전설비는 경우에 따라서 저출력이나 예비용으로 운전정지되도록 요청받을 수 있다. 이러한 상황에서는 전체적인 전기생산능력에 혼란이 야기되며, 수용가의 수요가 감소할 때 나타난다.

다른 외부요인도 의도적이든 아니든간에 발전소의 생산능력에 제한을 줄 수 있다. 앞에서 언급한 전기공급 및 수요와 관련된 요인과는 반대로, 발전소 운영자에 의해 경험되는 외부요인들이 있다.

이들 외부요인은 발전소의 신뢰성에는 영향을 미치지 않으나, 전체적인 전기생산체통에 운전비용을 추가적으로 부담시킨다. 예를 들면, 송전능력 부족, 환경보호규정의 적용(폐수온도 등), 또는 지진과 같은 특별한 상황이다.

이러한 개념에 입각하여 Capability Factor (이하 발전능력률이라 칭함)와 Load Factor (이하 이용률이라 칭함)를 정의해 볼 수 있다.

● 발전능력률

이는 계통구성기기들의 능력을 나타낸다. 계통능력을 제한하는 내부원인으로는 보수기간 및 연료재장전기간 뿐만 아니라, 사고 및 비계획적인 능력상실요인 등이 있다.

$$Kd(\%) = 100 \times \frac{ED}{PCN \times H}$$

Kd : 발전능력률

ED : 구성기기의 실제 상황하에서 계통이 낼 수 있는 최대출력으로 생산할 수 있는 발전량

PCN×H : 주어진 기간동안 최대출력으로 계속 생산할 수 있는 발전량

이용률

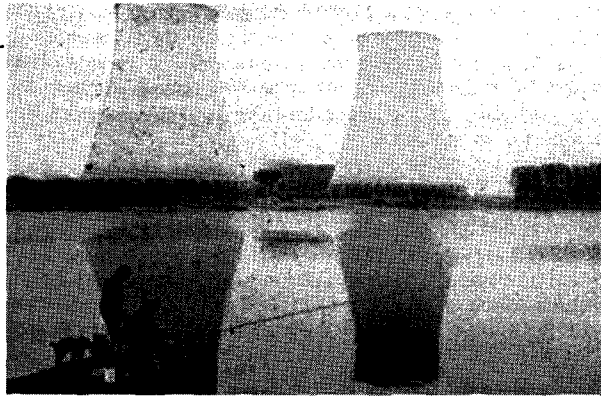
계통의 실제 운전상태를 나타낸다. 이는 미국에서 Capacity Factor라 부른다.

$$Kp(\%) = 100 \times \frac{EN}{PCN \times H}$$

Kp : 이용률

EN : 계통에 의해 실제 생산된 발전량

PCN×H : 주어진 기간동안 최대출력으로 계속 생산할 수 있는 발전량



오늘날 세계 원자력발전소는 일반적으로 기저부하로 운전하고 있는 원자력발전소의 경우, 발전소 정지 또는 출력 감발을 유발하는 외부요인은 거의 없다. 그러므로 이런 조건하에서는 Kd와 Kp는 다르다. 프랑스에서는 1983년 이래 발전능력률과 이용률 실적간에 큰 차이가 나고 있다.

3.2 基準値

프랑스 원자력계획의 초창기에는 가압경수로형 발전소의 운전경험으로 프랑스 발전소에서 기대되는 발전능력률의 기준값을 설정하기에 충분하지 못했다.

그러나 전기사업자가 향후 전력수요를 충족시키기 위한 투자계획을 일관성있게 평가하기 위하여 발전능력률의 기준값 설정이 필요하게 되었다. 즉, 국내외적으로 기준값의 중요성과 실제 운전결과와의 비교를 위한 기준값의 필요성이 대두되었다.

이리하여 동일 기술(가압경수로형 발전소)과 동등한 출력(900~1,300MWe)을 갖는 원자력 발전소간에 실적을 비교하기 위하여 국제적으로 통용되는 통계가 사용되었다.

초창기에 설정된 기준 발전능력률은 설비의 운전년수가 증가하면서 증가했다. 왜냐 하면, 기기가 개발되고 또한 운전 초년도의 문제점들이 해결되었기 때문이다. 일반적으로 보수 및 핵연료 재장전을 위한 첫번째 발전정지는 2년차 또는 3년차에 발생한다. 이때 3개월간의 발전정지시에 핵증기공급계통에 관한 법령에 의거 안전기관에 의해 완벽한 검사가 실시된다.

〈표 1〉 운전년수 4년 이상 발전소의 누계 발전능력률
('89년 5월1일 현재)

Unit	Age (years)	Kdc (%)	Average Kdc for age group (%)
Fessenheim 1	13	71.0	71.0
Fessenheim 2	12	78.6	78.6
Bugey 2	11	68.0	73.4
Bugey 3		74.8	
Bugey 4		77.9	
Bugey 5		76.7	
Dampierre 1	10	75.3	78.00
Dampierre 3		84.4	
Gravelines 1		76.7	
Dampierre 2		82.2	
Gravelines 2	9	83.7	82.2
Gravelines 3		83.5	
Saint - Laurent B1		72.4	
Tricastin 1		85.2	
Tricastin 2	8	86.2	83.7
Tricastin 3		85.8	
Blayais 1		85.8	
Dampierre 4		85.0	
Gravelines 4	7	85.7	85.7
Saint - Laurent B2		79.4	
Tricastin 4		83.4	
Blayais 2		84.6	
Chinon B1	-	87.0	-
(ensemble)	-	-	79.4

운전년수가 4년 이상되는 발전소의 기준 발전능력률은 71%로 설정되었으므로 4년 이상된

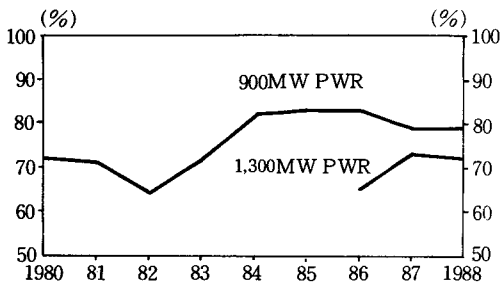
발전소의 발전능력률실적은 이 기준값 71%와 비교되어야 한다.

4. 900MWe 및 1,300MWe PWR 發電所의 運轉實績

4.1 年間實績

900MWe 가압경수로형 발전소의 경우, 발전 능력률은 1983년 이후 71%를 넘었으며, 1984년 이후에는 78%와 83% 사이이다. 프랑스에서는 장기적인 평균 전망으로 80%를 목표로 하고 있다(그림4 참조).

1,300MWe 가압경수로형 발전소의 경우는 발전능력률이 낮다. 이는 발전소 기수도 적고, 운전년수도 짧으며, 완벽한 검사를 위해 첫번째의 장기간 발전정지에 의해서 큰 영향을 받기 때문이다. 그러나 1,300MWe 발전소의 운전실적은 900MWe 발전소의 동일기간동안의 운전실적 보다 더 좋은 실적을 나타내었다.



<그림 4> 발전능력률(상업운전중인 PWR발전소)

4.2 累計實績

900MWe 가압경수로형 발전소의 누계발전 능력률을 표1에 나타내었다.

이 발전소들은 1982년 이전에 계통에 병입된 발전소로서 운전년수가 적어도 6년 이상 되었다.

이 실적자료에 의거한 주요 특기사항을 보면, 다음과 같다.

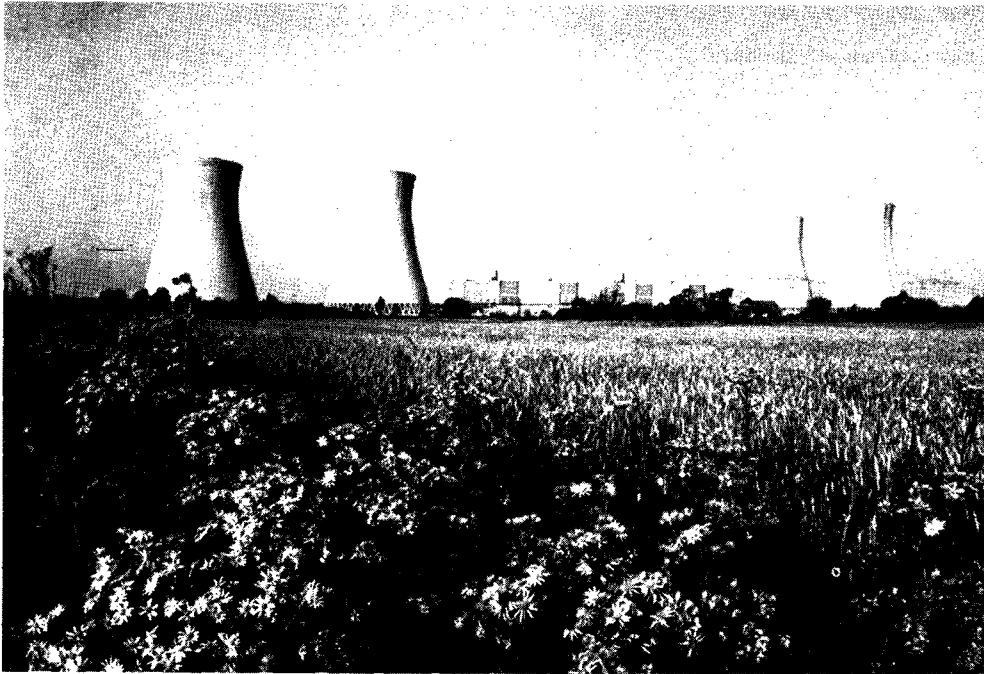
- 전체 평균이 79.4%
- 초기 발전소(Fessenheim, Bugey)의 경험이 후속 발전소로의 전수효과가 컸음
- 발전소 표준화로 인하여 최신 발전소의 발전능력률은 80% 이상
- 경험의 전수로 인해 동일부지내의 경우, 선행 발전소 보다 후속 발전소의 실적이 증가 : 경험이전곡선이 형성됨

900MWe 가압경수로형 발전소의 좋은 운전실적으로 인하여 향후 원자력발전소 수요를 평가하는데 있어서 가정 발전능력률을 수정하게 되었다. 이로서 3년 이상된 1,300MWe 및 1,400 MWe 발전소의 연평균 발전능력률은 74%로 가정되었다.

그렇지만 오랜 기간동안 현재와 같이 좋은 실적을 기대하는데는 신중을 기하고 있다. 왜냐하면, 1,300MWe 발전소의 운전경험이 900MWe 발전소 보다 비교적 짧기 때문이며, 운전년수 증가로 증기발생기 교체와 같은 부정적인 요소도 예상되기 때문이다.

<표 2> 동절기의 발전능력률

	900MW PWR (%)					1,300MW PWR (%)				
	Kd	Kip	Kipr	Kif	기수	Kd	Kip	Kipr	Kif	기수
겨울 82/83	79.2	14.1	1.1	5.5	20	-	-	-	-	-
겨울 83/84	91.4	4.2	0.7	3.7	25	-	-	-	-	-
겨울 84/85	91.3	3.1	0.0	5.6	30	-	-	-	-	-
겨울 85/86	93.8	2.9	0.0	3.3	32	96.5	0.0	0.0	3.5	3
겨울 86/87	97.2	0.6	0.0	2.2	32	67.9	10.4	7.6	14.2	6
겨울 87/88	92.9	0.4	1.1	5.6	33	88.6	2.6	0.0	8.8	10
겨울 88/89	76.1	6.8	12.6	4.4	34	80.6	4.8	6.2	8.4	13



▲Dampierre 原電 풍경

4.3 冬節期實績

기저부하로 운전되는 동절기의 실적을 비교해 보는 것이 합리적일 수 있다. 프랑스에서의 동절기는 3개월간(12,1,2월)이다. 이 기간에는 계획정지가 최소로 억제되며, 발전정지는 연간 전체 전력생산체계의 경제성을 고려하여 컴퓨터모델로 운영된다.

겨울철 발전능력률은 종종 90%를 상회하며, 900MWe 발전소는 일곱번의 겨울철동안에 평균 89%, 1,300MWe 발전소의 경우는 네번의 겨울철동안에 평균 82%를 달성했다(표2 참조).

이들 결과를 정확히 평가하기 위하여 세가지 유형의 발전손실을 고려해 보면 다음과 같다.

- Kip : 계획된 발전능력 손실량
- Kipr : 요청에 의한 발전정지(계획발전정지의 연장 등)
- Kif : 비계획 발전능력 손실량

이들 겨울철의 평균 계획된 발전능력 손실량은 900MWe 발전소의 경우는 4%, 1,300MWe

발전소의 경우는 4.8%이었다. 요청에 의한 발전정지로 인한 손실량은 각각 2.5%와 4.1%이고, 비계획 발전능력 손실량은 각각 4.3%와 9.3%이다.

900MWe 발전소의 경우, 계획 발전정지를 제외한 발전능력률은 93%이며, 비계획 손실량만을 고려하면 95%로 증가한다.

5. 結 論

일반적으로 프랑스 가압경수로형 발전소의 운전실적은 극히 만족스럽다. 가동결과를 분석하면 매우 유의한 발전소 경험곡선을 얻을 수 있는데 900MWe 발전소에서는 이미 성능이 확인되었고, 1,300MWe 발전소에서도 확인되고 있다.

발전소 표준화는 이러한 결과를 얻는데 매우 유의한 요인일 뿐만 아니라, 성공을 확실하게 보장해 주는 방안이 될 것이다.