

技術情報

西獨 PWR의
制御設備와
運転性能

西獨에서는 原子力 開發初期부터 장래의 比重增大를 豫상하여 負荷追從性能이나 急速起動등 운전의 flexibility를 갖춘 原子力 Plant를 豫망하였다. 이와 같은 needs를 배경으로 開發된 KWU社의 PWR에 대한 制御設備의 運轉性能을 소개한다.

원자력의 円滑한 開發을 도모하려면 原子力 Plant의 安全性 確保와 利用率 向上에 보다 더 넓은 國民의 이해를 얻는 것이 필요하다. 한편, 가까운 장래 원자력발전의 비중이 높아짐에 따라 利用率 向上과 함께 負荷追從運轉등의 needs에 對備하여 原子力 Plant도 운전에서 높은 flexibility를 갖출필요성이 높아질 것으로 豫상된다. 이와 같은 面에서 주요한 기능을 담당하고 있는 것이 Plant의 神經系統인 計測制御系이다. 西獨의 輕水炉 開發도 導入技術을 기초로 해서 출발한 것이나, 그 초기부터 국내사정과 needs에 맞는 自主技術確立에 노력하였다. 원자로의 制御設備分野에서도 獨自의인 事象으로 특징이 있는 System을 開發하고 있다.

I. 西獨USER의 要求

서독의 user는 開發초기부터 원자력의 比重增大를 豫상하여 원자력발전 Plant의 운전에 높은 flexibility를 要求해 왔다.

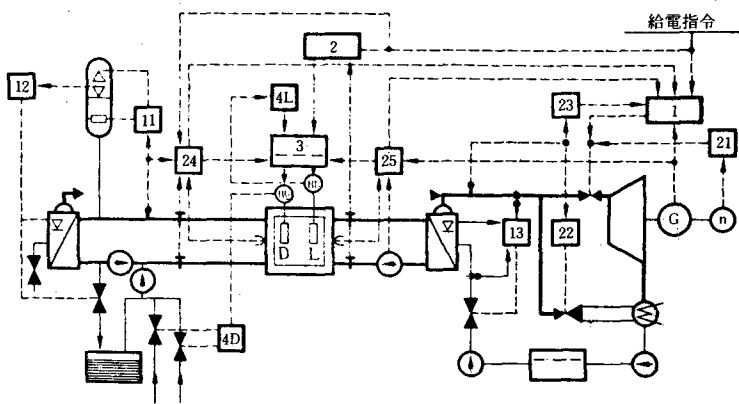
1. 負荷追從性能

VGB (大型發電所의 所有者組織)에서는 出力 range 40~100%에서 다음과 같은 성능을 要求하고 있다.

Lamp變化 : 定格出力의 $\pm 5\%$ /分 (變更幅 60%)

定格出力의 $\pm 10\%$ /分 (變更幅 30%)

Step變化 : 定格出力의 $\pm 5\%$ (step 간격 5分)



1. turbine 出力
2. 冷却材 温度
3. 制御棒 制御
4. 制御棒 bank 位置 (D, L bank)
11. 冷却材 压力
12. 加压器 水位
13. S G 水位
21. turbine 速度
22. 主蒸汽 上限 压力
23. 主蒸汽 下限 压力
24. 原子炉 出力 / 出力 制限
25. 制御棒 选择 投入

表 1 PWR 发电所 制御 系統 圖

2. 높은 利用率을 확보하는 運轉의 flexibility

가. 外部原因에 依한 事故時 原子炉 trip 防止 : 負荷遮断時 所內負荷 单独運轉, 主冷却材 pump trip 시 4 loop로부터 3 loop運轉으로 自動移行 등.

나. 原子炉 trip後 다시 迅速하고 安全한 再起動.

다. 原子炉 trip을 방지하는 保護機能의 自動化.

II. 原子炉 制御系

表 1에 原子炉 制御系統圖를 표시하였다. PWR의 훌륭한 自己制御性을 이용해서 원자로 出力을 冷却材 温度制御에 의해 發電機 負荷에 追從시키는 制御方式을 採用하고 있으나 plant의 起動·停止 또는 다음과 같은 原子炉 制限系의 介入時에는 原子炉側에서 出力이 設定되어 이것이 發電機 出力을 追從하게 하는 制御方式으로 한다.

表 1에 原子炉 制御系의 주요한 요약을 표시한다.

1. 冷却材 平均温度 一定制御 (表 2 参照)
- 이 制御方式은 負荷變動에 대해서 process

變수가 安定되고 1次冷却系의 부피와 機器의 熱疲労를 輕減시킨다. 反應度 制御에 관해서는 冷却材 温度의 反應度 feedback 이 正常狀態에서는 作用하지 않고, 負荷變動의 過多時에 制御를 backup 하도록 作用한다. 또, 出力上昇時에는 1次系와 2次系의 保有에너지를 有効하게 이용할 수 있고 制御棒 등의 制御要素의 부담을 가볍게 하며 負荷追從性을 向上시키고 있다.

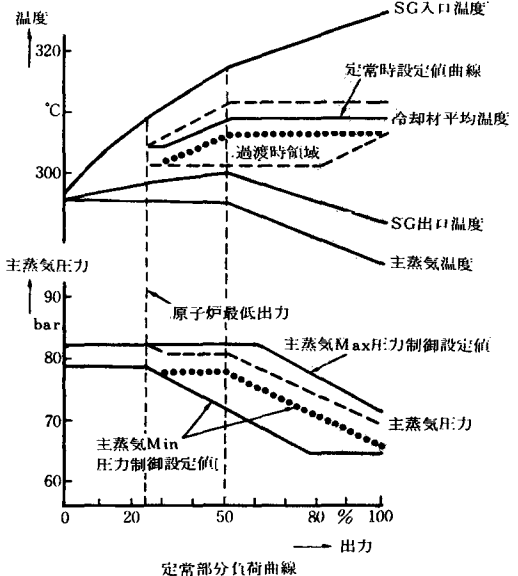


表 2 定常部分 負荷 曲線

2. 制御棒, Chemical Shim 및 Xenon의 有効한 利用

制御棒은 D(Doppler) bank와 L(出力) bank의 2群으로 나누어지고 모든 制御棒은 原子炉 出力制御에 이용된다.

가, D bank : 表 3 에서와 같이 炉心の 対称 位置에 있는 制御棒 4本을 1群으로 해서 4개의 sub-bank를 구성하며 正常状态에서

는 表 4 에서와 같이 原子炉 出力에 따른 挿入位置에 program制御를 한다.

나, L bank : D bank의 16本을 除外한 모든 制御棒으로서 구성되며, 正常状态에서는 表 4 에서와 같이 炉心に 약간 挿入되어 炉心の 出力分布制御와 D bank의 出力制御를 backup하는 데 사용한다.

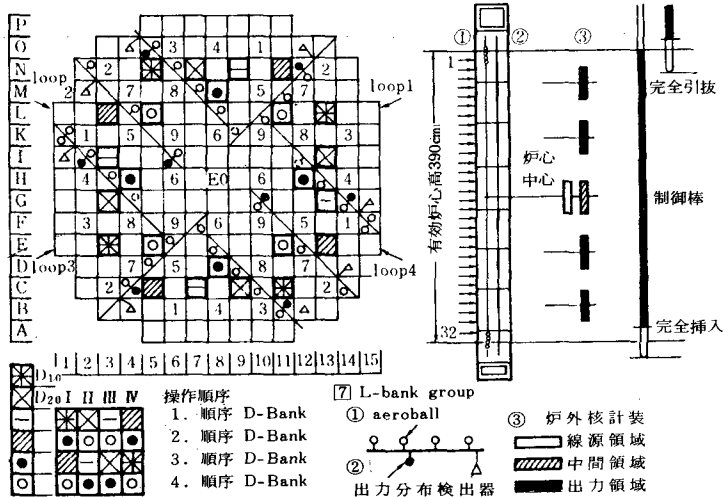


表 3 炉心断面—中性子束計測設備

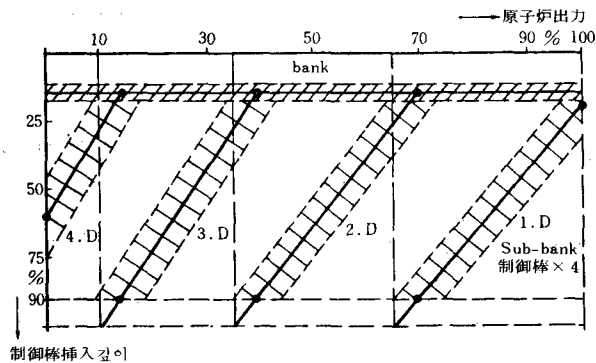


表 4 制御棒操作 Program

이와는 별도의 制御要素로서 chemical shim과 炉心 毒物Xenon(Xe)의 蓄積과 燃燒의 有効利用을 고려해서 負荷變動의 정도에 따라 다음과 같이 區別하여 사용하고 있다.

(1) 一定負荷(燃燒度 補償)와 負荷小變動: Chemical Shim(晝夜사이클運轉: Xe의 蓄積·燃燒).

(2) 中程度의 負荷變動: D bank와 Chemical Shim.

(3) 大負荷變動: 上記要素에 L bank 追

加(部分負荷에서는 冷却材平均溫度降下도 限定利用).

이 自動시스템은 다음 3과 4項의 制御機能 自動化를 가능하게 한다.

3. 制御棒位置制御(表 5 參照)

이 制御loop는 停止反應度余裕 및 負荷追從性能을 확보하기 위해 制御棒bank를 設定位置로 유지하게 하는 것으로서 2개의 sub-loop가 있다.

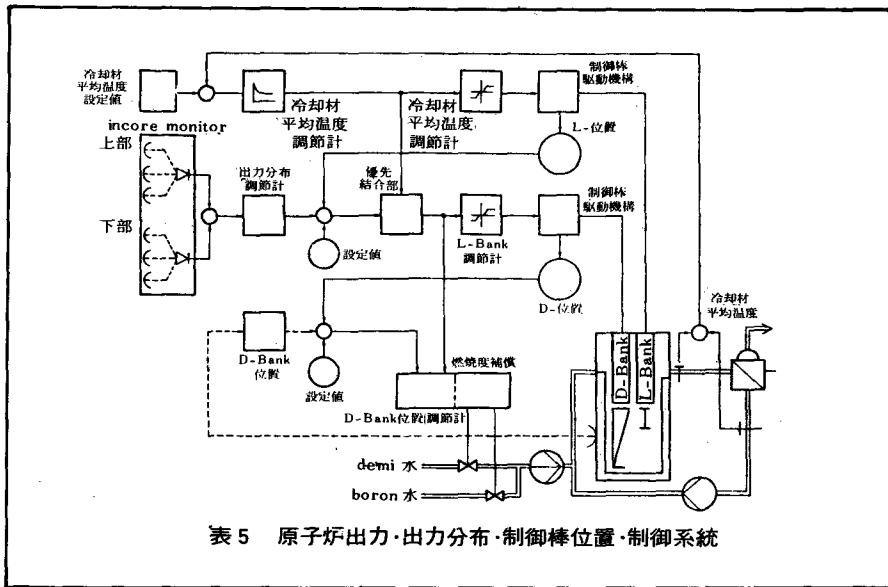


表 5 原子炉出力·出力分布·制御棒位置·制御系統

가. L bank位置制御: 이 制御loop는 出力變動 또는 出力分布의 過度變化 後 D bank를 制御要素로 사용해서 Lbank를 設定位置로 되돌려 보낸다. L bank가 設定位置의 不感帶를 지나서 깊게 挿入되면 D bank操作의 優先命令에 의해 D bank를 삽입하여 이 反應度を 補償하도록 Lbank가 빠져나온다.

나. D bank位置制御: Chemical Shim(boron水 또는 demi水の 注入)을 制御要素로 사용하여 D bank를 原子炉 出力依存의 設定位

置로 유지시킨다.

4. 出力分布制御(表 5 參照)

이 制御loop는 出力變動, bank 位置의 調整 또는 Xe에 의한 出力分布變動을 L bank의 操作으로 자동적으로 조정한다. 制御는 固定式 incore monitor에 의한 auxiliary offset 신호(炉心上部 또는 下部로의 出力分布의 偏倚를 나타냄)를 L bank位置制御 loop의 設定値 補正信號로 주어서 L bank位置를

變更하므로써 행한다. L bank는 큰 反應度調整能力을 갖고 있으므로 몇 step의 操作으로 出力分布의 偏倚를 효과적으로 是正 가능하다. 이 制御方式은 1,300MW급의 大型爐心에서도 part length 制御棒을 사용함이 없이 安定된 出力分布가 얻어지는 장점이 있다.

Ⅲ. 原子爐制限系

전적으로 基低負荷運動을 對象으로 한 原子力 plant의 경우에는 process變動이 安定되고 그 감시와 보호조치는 비교적 쉽다. 따라서 安全思想도 黑이나 白이나(制御와 保護)로 충분하며 運転員에게 운전中의 發生事象을 극복하고 또 解析事故의 初期條件을 確保하는 기능을 委任하는 것도 가능하다. 이에 대해 높은 flexibility가 要求되는 原子力 Plant에서는 이와같은 기능을 모두 운전원이 수행하는 것은 불가능하다. 한편, 원자력 plant를 되도록 아끼면서 운전하는 것이 바람직하므로 이를 위해서는

1. 負荷要求에 關해 가능한 限 過渡變化를 制限 또는 円滑하게 한다.

2. 急速한 制御動作(set back)을 附加시켜 trip을 防止한다. (早期에 多樣하고도 조용한 保護動作)

3. 制御設備의 故障發生率을 低減시킨다.

等이 필요하다. 원자로의 安全性向上의 面에서도 事故解析의 初期條件을 保證하고 人爲的 error를 저감시키는 制御 시스템이 바람직하다. 이와 같은 背景에서 制御와 保護의 中間領域을 cover하는 制御시스템으로 개발된 것이 制限系이다. 따라서 운전원은 許容條件內에서 운전의 最適化와 Plant의 신중한 감시가 중요한 임무가 된다.

서독의 技術基準 KTA-3501에서는 制限系

의 기능을 다음 3종류로 구분하고 있다.

- 가. 狀態制限：特定事故(分析)의 初期條件을 만족하도록 process變數의 값을 制限하는 것.
- 나. 保護制限：감시하는 安全變數(保護動作)의 作動에 사용하는 process變數)를 通常 運轉時의 値로 되돌리는 보호동작을 行하는 것.
- 다. 運轉制限：Plant의 이용율을 높이기 위해 process變數의 値를 제한하는 것.

㉞와 ㉟의 기능에 대해서는 거의 原子爐 保護系에 準한 설계기준을 적용하고 있다. 回路構成은 4重Channel로 하고 2 out of 4의 論理回路를 원칙으로 하고 있다. 최근의 표준 Plant에서의 制限系의 機能構成을 表 6에 표시한다. 表 7에 製限界의 主要作動Channel과 制限動作을 나타냈다. 制御系의 기능이 Process變數를 意圖한 通常운전시의 變動領域에 유지하는데 있음에 대해 制限系의 기능은 어떠한 이유로 變動領域을 벗어

表 6 製限界의 機能構成

狀態制限機能	保護制限機能
1. 原子爐出力制限 가. 總出力：slide設定値(出力分布歪 補正項付) 나. MCP trip時 出力 Cut back 다. 負荷遮斷時 出力 Cut back 2. integral DNB制限 (右欄第 3項 ㉞에 포함) 3. 冷却材壓力制限 (脆性破壞防止付) 4. 冷却材溫度制限 5. 加壓器水位制限 (固定設定値) 6. 冷却材inventory制限 (冷却材溫度依存加壓器水位)	1. 制御棒操作制限 가. L bank삽입 나. D bank삽입 다. 操作 speed 라. 操作 Sequence 2. demi水 供給制限 3. 出力密度制限 가. 上部爐心 出力密度 (local DNB項付) 나. 下部爐心 出力密度
運轉制限 機能	
1. 主蒸氣 Min. 壓力制御 2. 主蒸氣 Max. 壓力制御	

나면 그 Process變數를 低減시켜 정상영역으로 되돌려 주는데 있다.

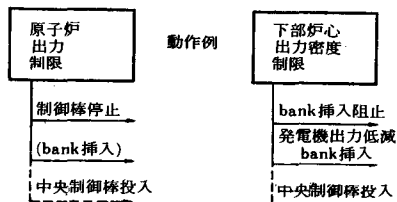
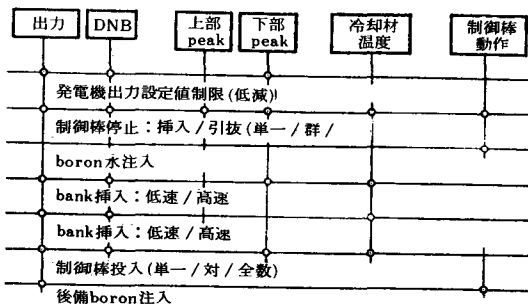


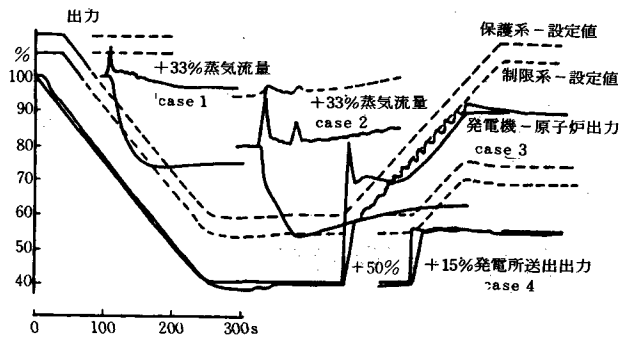
表 7 制限系의 主要Channel과 動作

制限動作이 保護系의 Trip 動作과 本質의 所以 다른 것은 狀況에 따른 段階의 措置에 의해 Plant를 通常운전상태로 되돌려 주는 점에 있다. 이와 같은 制限機能의 대표적인 것에 대해 추가 설명해 둔다.

1. 原子炉出力制限

이것은 원자로의 過大出力 및 과대한 出力上昇率을 방지하고 또 원자로 出力을 Plant狀態에 의한 通常의 許容레벨 이하로 되돌려 주는 기능을 갖는다. 원자로 出力의 許容레벨과 보호계의 Trip 設定値 사이에는 數段階의 設定値가 있으며 D bank의 삽입, L bank의 삽입, 制御棒의 선택投入등 順次로 강력한 出力制限動作이 작동하여 원자로의 Trip을 방지한다. 出力을 制限하는 조건이 해소되면 원자로出力은 設定速度로 자동

적으로 回復한다. 表 8에 원자로 出力制限의 作動例를 표시한다.



case 1 : 100%出力에서 蒸氣負荷急增
case 2 : 80%出力에서 蒸氣負荷急增
case 3, 4 : 40%出力에서 系統負荷急增

表 8 出力制限의 作動例

2次系의 고장(Turbine Bypass Valve의 誤動作 등)에 의해 主蒸氣負荷가 33%急增했을 경우 制限系의 設定値에 저촉되어 원자로出力이 許容레벨로 제한되고 發電機出力이 主蒸氣의 下限壓力을 回復할 때까지 내려져 있는것을 나타낸다.

2. 原子炉 出力密度制限

이것은 큰 出力變動, Xe에 의한 出力振動, 또는 制御系의 고장에 의한 制御棒의 誤動作 등에서 出力分布가 현저히 변동했을 경우에 出力密度와 DNB比를 許容値로 制限한다. 炉心の 出力密度는 incore monitor로 1,300MWe 급의 炉心에서 48點計測하여 aeroball系에서 求한 出力分布로 교정한다. (표 3 참조)를 사용해서 충분한 精度로 감시된다. 上部炉心に 현저한 出力 Peaking이 생겨서 出力密度가 通常운전시의 値를 넘으면 制限系는 設定레벨에 對應해서 L bank引抜을 阻止, L bank삽입, 원자로의 許容出力

低減등 단계적 제한동작을 행하여 出力密度를 통상의 値로 되돌린다.

3. 制御棒 送扱投入

이 기능은 Plant의 擾亂발생시 制御棒의 急速挿入에서도 原子炉出力의 cut back을 충분히 달성할 수 없을 경우에 Plant의 조건에 対応한 必要數의 制御棒을 선택해서 自由落下시키는 것이다. 대표적 作動例를 소개한다.

가. 負荷遮断時的 投入 : 原子炉出力과 發電機出力의 mismatching이 커지면 負荷遮断으로 판단되어 对称位置의 制御棒雙을 順次로 投入시켜 原子炉出力을 turbine bypass valve의 容量以下로 cut back시켜 所內 負荷運轉에 移行한다. 이 投入기능에 의해 turbine bypass valve의 용량은 定格蒸氣流量의 50%이하의 것으로 충분한 것이라고 되어있다.

나. 主冷却材 Pump Trip時的 投入 : Pump1 台가 Trip할 경우 그 Speed가 保護系 Trip 設定値로 低下할 때 까지 所要本數의 制御棒을 선택하여 동시에 投入시켜 4 loop 운전에서 3 loop 운전으로 移行하는데 安全한 레벨까지 原子炉出力을 cut back한다. 그 後, 3 loop의 特性曲線에 맞추어서 制御變數를 調整하여 投入制御棒의 復歸, 許容出力 (약 70%)으로의 出力回復을 자동적으로 行한다. 制限系는 西獨의 PWR에서 獨特한 制御시스템인데 그 특징을 요약한다.

(1) 運転員에 自信을 付与한다.

(가) 人爲的 誤作動이 있더라도 우선 出力低減을 계속하며 다음에 出力의 cut back, 마지막에 Trip되는 것을 운전원 이 알고 있기 때문이다.

(나) 手動介入은 운전원이 과오(고장)를 除去, 혹은 自動制御裝置보다도 좋은 処置를 取할 수 있다고 확신할 때에만 行하면 된다.

(다) 먼저 자동조작을 注意깊게 監視하여 手動操作하기 전에 어느 정도의 安全余裕를 얻을 수 있다는 것이 운전원에게는 바람직한 것이 된다.

(2) Plant全體의 flexibility를 증가시킨다. 制御動作의 段階的作動 및 制限界의 存在가 서로 관련되어 Plant를 모든 制限界의 第1作動設定値(Plant를 손상시킬 우려가 없는 限)에 가깝게 까지 운전이 가능하다. 만약 어떠한 것이 작동하더라도 그 영향은 적으면서도 극히 작은 hysteresis로 영향이 없어진다.

(3) 制限界의 存在에 의해서만 가능한 制御方式을 採用할 수 있다. L bank에 의한 制御, 單一Channel에 의한 制御棒의 制御의 例는 制限界의 存在에 의해서 許容된다.

(4) 手動操作의 機會와 誤動作의 可能性을 감소시킨다.

(5) 認許可手續의 簡略化가 도모된다. 고장(誤操作)의 방지와 限界條件, 安全分析의 初期條件을 保証.

IV. 運轉性能

1. 負荷追從性能 : 西獨PWR에서 行한 負荷變動試驗의 結果를 表9에 표시한다.

Lamp變化의 變化率과 變動幅에 대해서 前述의 VGB의 요구를 충분히 만족시키는 성능을 나타내고 있으며 Step變化 $\pm 10\%$ ($\pm 15\%$ 의 case도 있다 : 表9의 變化速度 60%/min참조)가 가능하다.

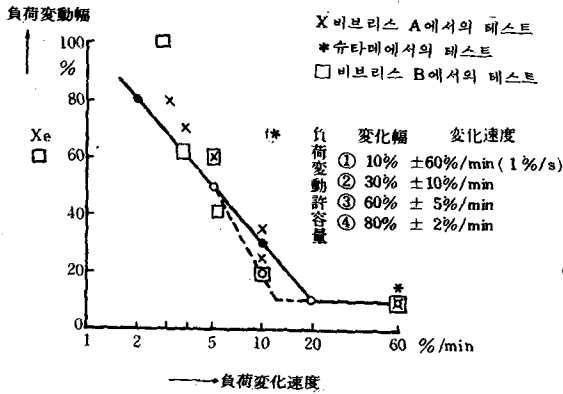
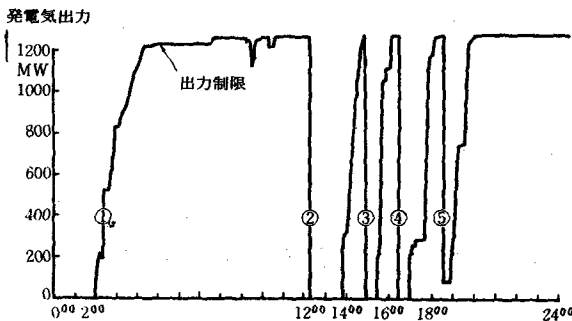


表9 西独의 PWR原電에서 可能한 負荷變動

2. 急速起動: 비브리스A(1,200MWe)에서의 실적을 表10에서 표시한다. 6時間 이내에 Zero負荷에서 定格負荷까지의 出力上昇을 네번 행하고 있다. 이 表에서 최초의 出力上昇은 16시간의 無負荷상태에서의 Xe蓄積後에 행한 것이다. 定格出力에 가까워지면 出力分布의 변동으로 下部炉心に 出力 Peaking이 생겨서 制限系의 作動에 의해 出力을 제한하여 炉心を 보호하고 있는 것을 알 수 있다.



①16時間의 無負荷狀態부터의 出力上昇時 ④負荷遮斷時
②所內電氣系故障(Diesel投入)時 ⑤所內負荷으로의 負荷遮斷時
③Turbine trip時

表10 비브리스A原子力發電所에서의 起動試驗実績

表11은 1,300MWe Plant의 起動과 負荷追從特性을 요약한 것인데 大幅的인 出力上昇이 制約을 받을 우려가 있는것은 炉心條件이 極히 不利한 경우뿐이다.

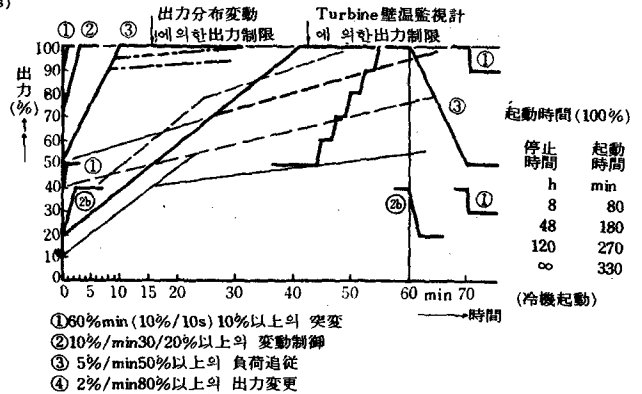


表11 1,300MW·KWU·PWR原電의 負荷變動特性

3. 日負荷追從運転: 비브리스A에서 炉心壽命 末期에 행한 100-60(6時間)-100% 사이클의 운전기록을 表12에 표시한다. lamp變化 5%/分에서 發電機 出力設定을 바꾼 全自動運転에서의 Peak出力密度의 最大 Overshoot는 平均値의 5%에 불과하다. 出力減少前과 定格出力 復歸後의 軸方向出力을 비교하여도 最適의 制御方式임을 알 수 있다. 表13은 Xe의 蓄積과 燃燒을 有效하게 이용한 Case를 표시한다. 出力低減後, Xe 축적을 補償하기 위해 D bank가 빠지며 炉心은 低負荷로서 rod free의 상태로 된다. 出力上昇은 demi水의 注入으로 개시되며 Xe의 燃燒만으로 30%/時의 出力上昇을 달성하고 있다. 이와 같은 最適運轉은 D bank 位置制御 設定을 변경하는 것만으로 가능하다.

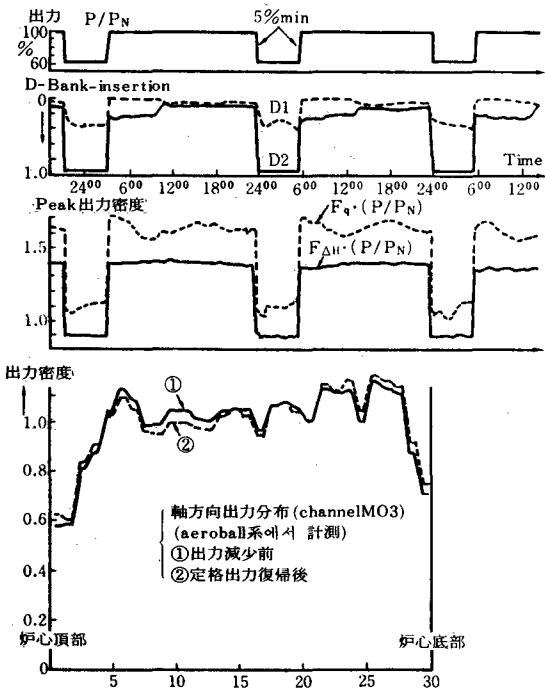


表12 日負荷追従運転(비브리스B1, 300MWe)
(100-60-100%사이클)

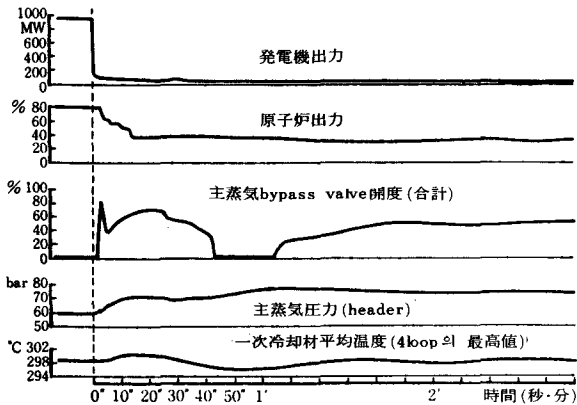


表14 비브리스A原子力發電所에서의 80%出力→
所内負荷으로의 負荷遮断実績

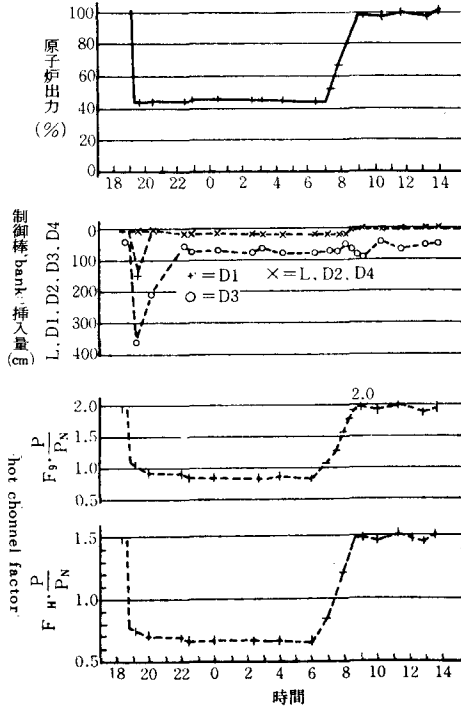


表13 日負荷追従運転(비브리스B1, 300MWe)
(100-40-100%사이클)

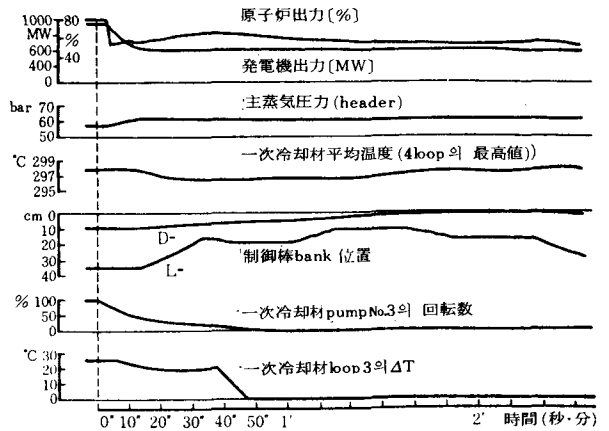


表15 비브리스A原子力發電所: 80%出力運転時
의 一次冷却材 pump No. 3 trip 実績