

負荷追從運轉에 따른 爐心特性 및 問題點

趙成濟

(韓電技術研究院 原子力研究室 先任研究員)

I. 序 言

原子力發電의 負荷追從運轉은 爐心の 核的, 熱水力의 特性, 爐心出力制御機構의 核的, 機械의 特性, 그리고 硼素濃度調期能力 등에 依하여 많은 制約을 받는다. 어떤 形態의 運轉을 하더라도 窮極의으로 지켜져야 할 것은 核燃料의 健全性 維持이며, 이를 위하여 安全運轉限界가 주어지고 爐心の 核設計는 이러한 限界에 따라 이루어진다.

出力變動이 豫想되지 않는 基底負荷擔當運轉에서는 運轉中 安全運轉限界를 벗어날 可能性이 거의 없지만, 負荷追從運轉을 하게 되면 隨時 혹은 週期的으로 電力計統(Grid)의 要求에 따라 爐心の 出力을 變化시켜야 하며, 이를 위한 制御棒의 使用으로 爐心 上下部의 어느 한쪽으로 出力이 치우쳐 安全運轉限界를 벗어날 可能性이 커지고 또한 지-논振動現像에 依한 爐心不安定(Instability)問題가 擡頭되기도 한다.

웨스팅하우스에서는 이러한 諸問題點을 考慮하여 CAOC(Constant Axial Offset Control) 運轉方式을 開發하여 自社가 設計한 모든 加壓

輕水爐에 適用시키고 있다. 이러한 CAOC運轉方式은 基底負荷運轉方式이나 負荷追從運轉時에 함께 適用되는 方式으로 最大로 安全餘裕度(Safety Margin)를 確保하게 하고, 지-논振動은 最小로 制限해 준다.

Mode A 運轉方式은 이러한 CAOC에 立脚한 負荷追從運轉方式이다. 이 方式은 定格出力 및 지-논平衡狀態時의 爐心 上下部 出力偏差를 基準으로 決定되는 Target Band內에 運轉中の 出力偏差가 維持되도록 하기 위하여 爐心の 硼素濃度를 함께 調節해야 함에따라 爐心末期(約 70%의 燃燒度 以後)에서는 負荷追從運轉이 不可能해지고, 硼酸稀釋率(Dilution rate)의 限界에 依해 Spinning Reserve Capacity가 좋지 않으며, 制御棒의 特性上 Frequency Control 運轉에도 많은 制約이 따른다. 보다 圓滑한 負荷追從運轉을 위하여 爐心末期에서도 負荷追從運轉을 可能하게 하며, Spinning Reserve Capacity를 向上시키고 Frequency Control 運轉도 圓滑하게 할 수 있도록 Mode A方式을 개선했던 運轉方式으로는 프랑스에서 開發하여 運轉中인 Mode G方式과 美國의 RAOC(Relaxed Axial Offset Control)와 MSHIM(Mechanical Shim), GFC/AFC를 適用하는 方法이 있다.

그러나 이러한 改善된 運轉方式들은 CAOC 方式에 比해 運轉범위를 넓혀줌으로써 運轉上의 融通性(Operating Flexibility)이 增大되는 利點이 있는 反面에 相對的으로 安全餘裕도가 줄어들어 運轉中 安全運轉限界를 벗어날 可能性이 커진다. 따라서 이러한 短點을 補完하기 위하여 運轉中 安全餘裕度를 恒常 監視할 必要가 생기는데, 現在의 Two-section 爐外出力監視器(Ex-core detector)로는 不充分하므로 이를 Multi-section 爐外出力監視器로 교체하는 것이 좋다. 이밖에 負荷追從運轉能力을 向上시키기 위한 各種 시스템이 開發中이거나 使用中에 있는 바, 이러한 시스템에 대해서도 알아보기로 하고 마지막으로 原子爐의 安全運轉에 큰 影響

을 미치는 지-논振動(Oscillation)에 대해서 기술하고자 한다.

II. 爐心出力制御의 基本概念

1. 爐心出力分布 設計基準

事故狀態를 包含하여 어떤 경우에도 核燃料被覆材는 그 健全性を 維持하도록 設計되어야 한다. 이러한 目的으로 爐心出力分布設計의 基本이 되는 다음 네가지 安全限界(Safety limits)가 주어진다.

가. 冷却材喪失事故制限(LOCA Limits) : 이 制限을 通하여 冷却材喪失事故期間 동안 核燃料의 冷却을 可能하게 하는 爐心の 幾何學的 構造가 維持된다.

나. 豫想되는 過渡期間中 核沸騰離脫率-OT ΔT 制限 : 이 制限을 通하여 燃料에서 冷却材로의 熱傳達狀態 變化時에도 燃料 被覆材 溫度의 過渡한 上昇을 防止해 준다.

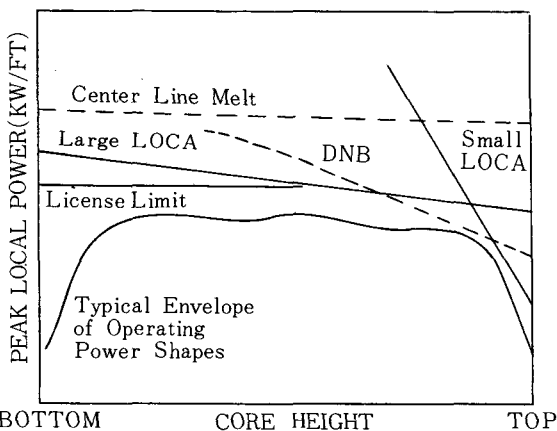
다. 正常運轉中の 局所出力의 變化量制限: 被覆材 Stress-strain限界 滿足.

라. 予想되는 過渡期間 동안 核燃料熔融制限-OP ΔT 制限 : 核燃料의 相變化로 인한 膨脹에 따른 被覆材 破損防止.

2. 正常運轉 Flyspeck

그림 1은 前節의 安全限界를 考慮하여 만들어

<그림 1> Schematic Demonstration of Typical KW/FT Limits



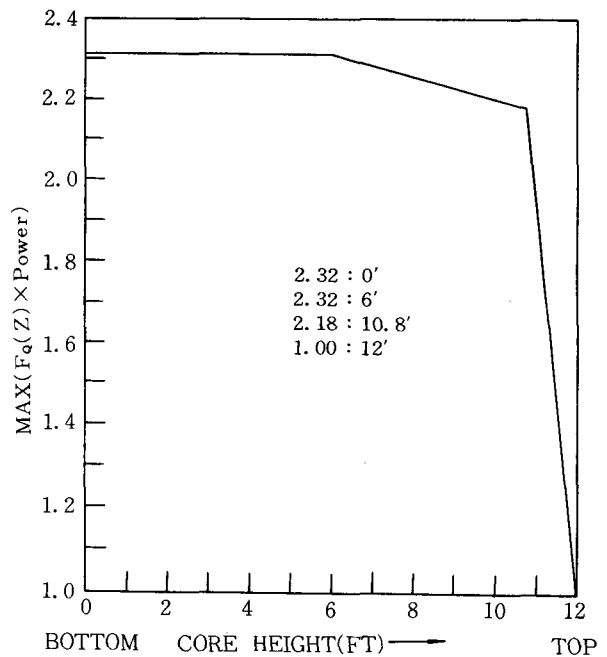
진 一般的인 安全한계도를 보여주고 있다. 이 그림에서는 爐心 높이에 따른 出力生産限界가 나타나 있는데, 同 制限値가 爐心の 높이가 높아짐에 따라 더욱 낮아진다는데 注目할 必要가 있다. 그 理由は DNB의 경우 冷却材의 엔탈피(enthalpy) 增加 등의 原因에 依해 DNB熱流速이 낮아지기 때문이며, LOCA는 Reflood 단계에서 上部로 갈수록 熱傳達이 좋지 않기 때문이다.

웨스팅하우스의 加壓輕水爐의 正常運轉 Flyspeck(그림 2)은 事實上 正常運轉時 爐心 높이에 따른 出力制限은 LOCA Limit에 依하여 決定되며, 나머지 限界에 대한 制限은 正常運轉도중에 發生이 豫想되는 제어뱅크 오동작, 硼酸稀釋事故 등 Condition II 事故에 對한 爐心 保護信號에 依하여 이루어진다고 생각된다.

3. Peaking Factors

原子炉 運轉時 爐心出力을 無限定 上昇시킬 수 없다는 事實은 앞서 言及한 正常運轉 Flyspeck에 依해 明白해진다. 이러한 限界를 넘어

<그림 2> Operating Envelope



서면 核燃料 自體 혹은 被覆材에 損傷을 招來하는 原因이 된다. 그런데 燃料에 損傷을 주는 過出力 現像은 局所出力(Local Power)에 의해 좌우되며, 원통형 연료인 경우 이러한 局所出力은 出力/단위길이(KW/ft)로 表示된다.

核燃料의 中心線 溫度가 UO_2 의 熔融溫度에 달하는 線型出力密度는 一般的으로 대개 21.KW/ft로서 이를 基準으로 하여 연료봉 중심선 限界線이 決定되나, LOCA/ECCS 評價結果 얻어지는 線型出力密度 限界線(LOCA Limit)이 이 보다 훨씬 낮아 정상운전중 어떠한 局所出力도 LOCA Limit보다 초과하지 않도록 核設計者는 爐心 核設計를 하게 된다.

實際 原子爐에서 出力密度는 爐心 境界, 제어봉, 一定하지 않은 燃料의 濃縮度 等 여러 要因에 의해 爐心內 位置의 함수로 나타나므로 最大 局所 線型出力密度를 平均 線型出力密度(線爐心出力/總燃料棒길이)로 나눈 값으로 定義되는 첨두계수(Peaking Factor)를 使用하여 LOCA Limit를 나타내는 것이 편리하다. 웨스팅하우스 경수로의 LOCA Limit 첨두계수는 2.32가 一般的인 값이다.

核設計時 이러한 첨두계수를 계산하기 위하여 3-D 코-드를 使用하려면 수많은 Case를 계산하여야 하므로 엄청난 전산비용이 든다. 그래서 WH에서는 이러한 엄청난 전산비를 줄이기 위하여 1-D와 2-D 合成計算方法을 開發하여 使用하고 있다. 따라서 첨두계수는 다음과 같이 나누어진다.

$$F_q = \text{Max} [F_{xy}(Z) \cdot (Z)] (F_u^N) (F_q^E)$$

여기서

$F_{xy}(Z) = Z$ 위치에서 반경방향 첨두계수

$P(Z) = Z$ 위치의 노심 단위길이 出力/평균 노심 단위길이 출력

$F_u^N =$ 不確實度 補正因子 (1.05)

$F_q^E =$ 工學的 공차 補正因子 (1.03)

그러나 보다 간편하고 保守的인 첨두계수값은 가장 큰 半徑方向 첨두계수 F_{xy} 와 爐心の 단위

높이에 대한 最大와 平均出力의 比인 軸方向 첨두계수 F_z 값을 直接 補하여 얻을 수 있다. 即,

$$F_q = F_{xy} \times F_z \times F_q^E \times F_u^N$$

여기서 F_{xy} 값은 制御棒 및 可燃性 毒物質의 排列, 燃料의 濃縮度, 燃燒度에 따른 함수로서 WH 경수로에서는 그 設計方法이 表準化되어 있으며 最大 값이 거의 1.435로 爐心設計時 固定되어 運轉中 制御가 不可能하다. 反面에 軸方向 첨두계수 F_z 는 爐心の 燃燒度, 出力準位 제어봉 위치 그리고 지-논분포의 함수로서 狀態에 따라서 그 값이 크게 變하므로 運轉中 항상 制限值 以下가 維持되도록 制御해야 한다. 따라서 正常運轉中 F_z 를 制限值 以下로 維持함으로써 앞서 기술한 LOCA-Limit를 지키는 셈이 된다.

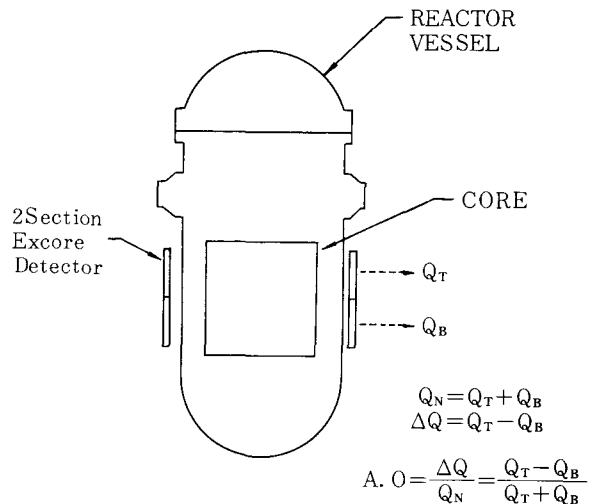
III. 現 WH加壓輕水爐 負荷追從運轉方法 및 限界

1. Axial Offset

前章에서 說明한 바와 같이 核燃料 損傷을 防止하기 위해서는 運轉中 恒常 軸方向 첨두계수 F_z 가 限界值를 넘지 말아야 한다.

그러나 F_z 는 現在의 核計測裝置로는 운전중 直接 測定할 수 있는 값이 아니므로 直接 測定

<그림 3> Two Section Excore Detector Arrangement



이 가능한 Axial Offset(A.O)를 設定하여 F_z 를 制御하는데 使用하고 있다. 그림 3은 現行 two-section 爐外核計測裝置의 排列狀態를 보이고 있는 바, 上部計測器는 上半部爐心出力을, 下部計測器는 下半部爐心出力을 計測하도록 되어 있다. 이렇게 計測된 上下部出力을 利用하여 出力偏差(ΔI) 및 A.O를 다음과 같이 정의한다.

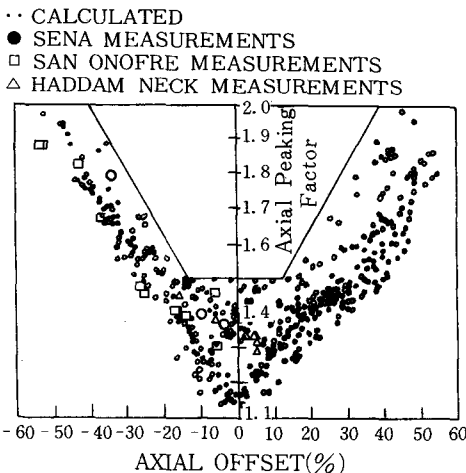
$$\Delta I = P_T - P_B = \text{上半部爐心出力} - \text{下半部爐心出力}$$

$$A.O = \frac{P_T - P_B}{P_T + P_B} =$$

$$\frac{\text{上半部爐心出力} - \text{下半部爐心出力}}{\text{爐心總出力}}$$

그림 4는 계산 및 實際 發電所에서 測定된 값을 利用하여 A.O와 P_z 와의 關係를 圖示한 것이다. 이 그림을 통하여 A.O와 P_z 가 直接的 相關關係가 있다는 것을 알 수 있고, 따라서 A.O를 적절히 제어함으로써 軸方向 첨두계수 P_z 의 제어가 가능하다는 結論을 얻을 수 있다. 그림에 나타난 A.O값은 爐心に 제어봉을 깊숙히 引入시켰거나, 지-논이 平衡되지 않은 狀態에서 계산 혹은 測定된 값으로 負荷追從運轉時의 爐心 狀態와 類似點이 많다. 이제 이를 바탕으로 한 負荷追從運轉時의 爐心の 軸方向 出力分布를 制御할 수 있는 運轉方式에 對해서 알아 보기로 하자.

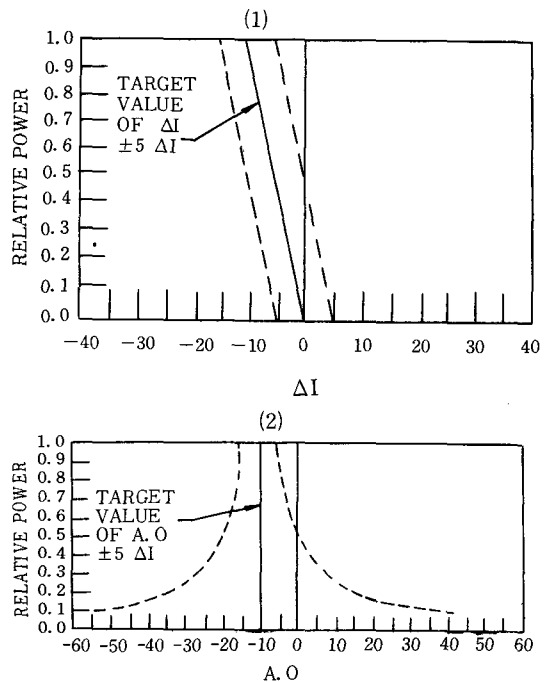
〈그림 4〉 Axial Peaking Factor Versus Axial Offset



2. Mode A 運轉方式과 負荷追從限界

CAOC運轉方式의 基本概念은 出力運轉中 II. 1에서 기술한 安全限界에 對한 最大의 安全餘裕度가 維持될 수 있도록 爐心の 첨두계수를 最小化하자는 것이다. 半徑方向의 첨두계수는 爐心設計時 거의 固定되므로 軸方向의 첨두계수만 運轉中 最小가 되도록 제어하면 되는데, 이를 위해 앞서 定義한 A.O概念을 利用, 出力變化에 關係없이 一定한 A.O값을 갖도록 運轉하는 것이 CAOC 運轉方式이다. 그러나 항상 一定한 A.O를 갖고 運轉한다는 것은 運轉上의 Flexibility가 전혀 없어 實際로는 쉬운 일이 아니다. 그리하여 그림 5(2)와 같이 A.O를 中心으로 한 一定한 target band內에서 運轉하도록 하고 있으며, 이러한 target band는 WH의 오랜 運轉經驗 및 分析에 依한 것으로서 出力變化에 따른 軸방향 지-논再分布를 最小화함으로써 軸방향 첨두계수의 變化에 影響을 줄 수 있는 지-논진동을 배제하여 安全餘裕度를 最小化하면서도 적절한 運

〈그림 5〉 Target Value and Operating Band for 10% Indicated Flux Difference at 100% Power

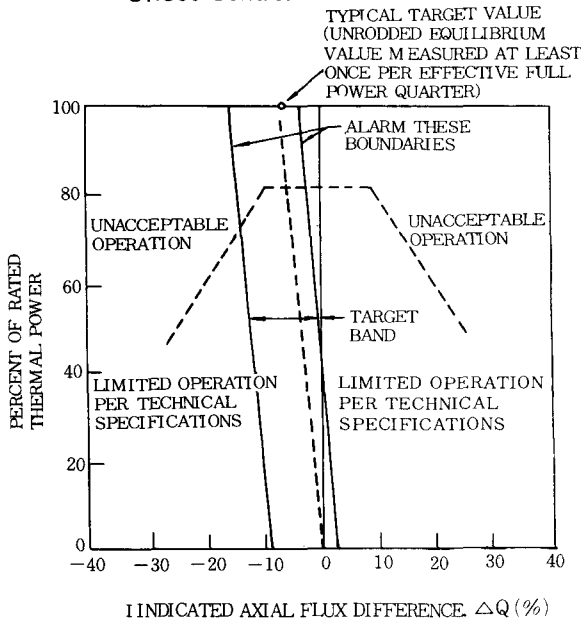


轉 Flexibility를 갖도록 決定된다. 그림 5(1)은 A. O target band를 ΔI target band로 바꾸어 놓은 것으로서 實際運轉時는 이러한 ΔI target band를 利用하여 운전한다.

ΔI target band의 決定方法은 다음과 같다. 즉, 제어봉 D 뱅크가 190스텝이상 爐心 밖으로 引出되고 出力은 全出力, 지-논平衡狀態가 되었을때 測定된 ΔI 와 零出力 $\Delta I = 0$ 點을 연결하여 target line을 설정하고 이 線을 中心으로 하여 爐心의 特性에 따라 $\pm 5\%$ 혹은 $+3, -12\%$ 등의 범위를 target band로 設定한다. 참고로 이러한 target band는 燃料의 燃燒에 따라 軸方向의 depletion이 달라지므로 週期的인 補正이 必要하게 된다. 그림 6에서는 target band外 TECH. SPEC에 依해 制限的으로 運轉이 許容되는 ΔI 범위가 表示되어 있다. 50%出力 以上에서 이 범위를 벗어난 集積時間이 24時間 동안 1時間을 넘지 않으면 지-논振動은 심각해지지 않는다. 그러나 1時間을 超過하면 出力을 50%以下로 즉각 減發하여야 한다.

運轉中에 ΔI 가 target band 왼쪽으로 벗어

〈그림 6〉 Typical Application of Constant Axial Offset Control



나는 경우 爐心의 硼素濃度를 增加시켜서 제어봉이 引出되게 하고, 오른쪽으로 벗어나면 反對로 硼酸稀釋을 통하여 濃度를 減小시켜 제어봉이 爐心으로 引入되게 함으로써 target band內에 ΔI 을 維持시킬 수 있다.

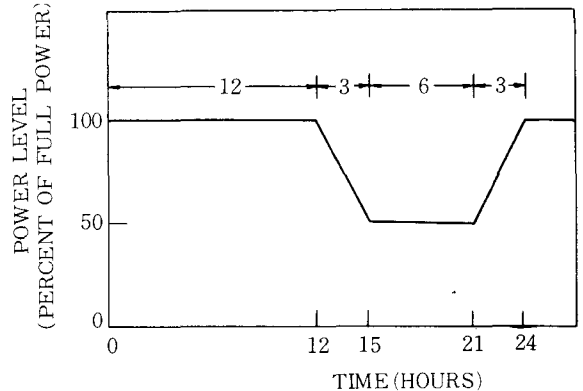
나. CAOC運轉方式에 依한 負荷追從運轉 - Mode A 運轉方式

WH의 Mode A 運轉을 위한 基本 日日負荷싸이클(daily load cycle)은 그림 7과 같은 12-3-6-3으로 하루중 12시간은 100% 出力을 내다가 3시간동안 出力을 같은 比率로 一定出力(30%, 50%, 70%의 세경우가 있음)으로 낮추어 6시간동안 운전한 후 다시 3시간동안 같은 비율로 100% 출력까지 상승시키는 運轉을 每日 反復하게 된다. WH는 爐心 核設計時 FAC分析을 통하여 이러한 負荷追從運轉싸이클에 따른 18 case(表1 참조)에 대해 燃燒度에 따라 그 値

〈表 1〉 FAC 18CASE ANALYSIS

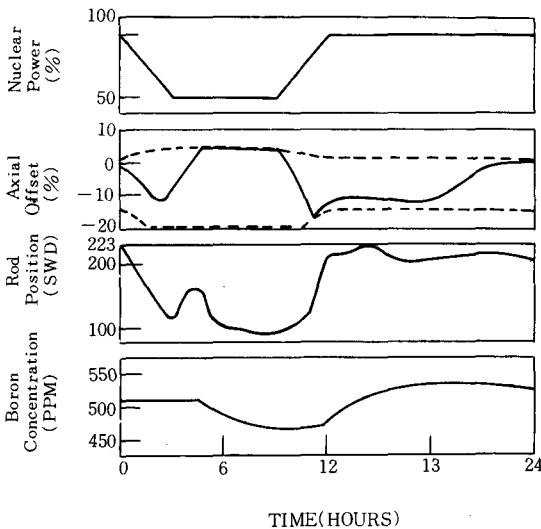
Time IN CYCLE LIFE	DEPLETION MODE	OPERATION TYPES	LOAD FOLLOW CYCLES	OVERPOWER CALCULATIONS
FAC BOL 1-6 150 MWD/MTU	Base Load	CNTR MINB	100-70-100 100-50-100	YES
FAC 85% EOL 7-12	Base Load	CNTR MINB	100-30-100 100-70-100 100-50-100	YES
FAC 85% EOL 13-18	Load Follow Δ	CNTR MINB	100-30-100 100-70-100 100-50-100 100-30-100	YES

〈그림 7〉 Reference Daily Load Cycle(12·3·6·3)

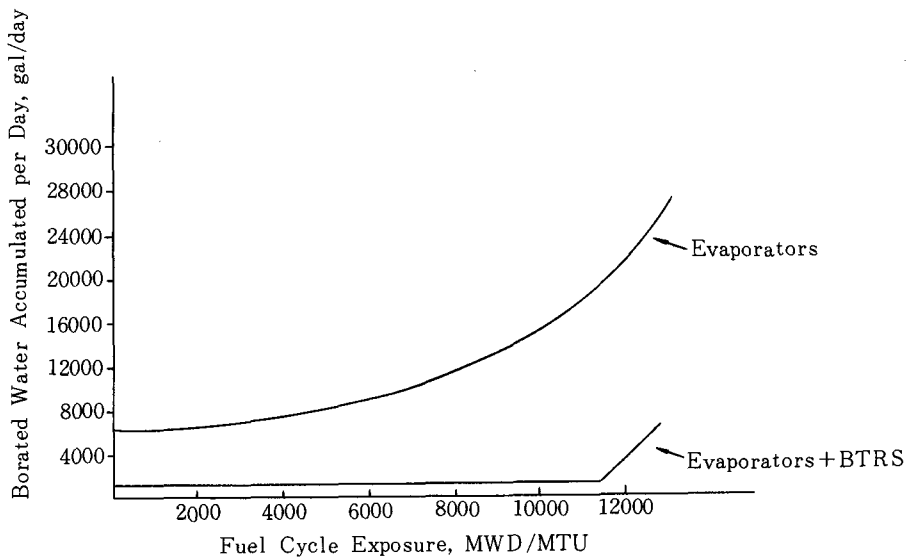


두계수를 계산하여 그림 2의 Flyspeck을 滿足하는가 確認한다. 이러한 負荷追從運轉中 ΔI 는 target band 內에 維持되어야 하는데 그 維持方法으로 MINB와 CNTR方法이 있다. MINB方法은 그림 8에 나타나 있는바와 같이 가능한 爐心の 硼酸濃度 變化가 最小가 되도록 A.O(혹은 ΔI)를 제어함으로써 硼酸회수계통(BRS)에 의한 부하추종한계를 最小化하자는 方法이며, CNTR은 A.O(혹은 ΔI)를 가능한한 target line에

〈그림 8〉 12·3·6·3 Load Follow with MINB Control



〈그림 9〉 Borated Water Accumulated Versus Fuel Cycle Exposure



近接 運轉함으로써 安全餘裕度を 最大로 하는데 그 目的이 있다.

이러한 CAOC에 의한 日日 負荷追從運轉은 앞으로 說明할 改善된 負荷追從運轉方法과 比較하여 볼때 制御棒을 爐心 깊숙이 引入시키기보다는 硼酸을 使用하므로 연료봉의 局所出力變化의 크기가 크게 減小되므로 PCI에 의한 燃料破損의 可能性이 적다는 점과 DNB 및 過出力(over power)에 대한 燃料의 保護 目的으로 設定된 원자로 停止신호에 대한 餘裕가 크다는 利點이 있다. WH 경수로에서는 OT Δ T 원자로 停止 設定值(DNB 保護目的)와 OP Δ T 원자로 停止 設定值(過出力 保護目的)는 ΔI 가 어떤 범위의 값을 벗어나면 그 벗어난 程度에 相應하여 낮아진다. 따라서 ΔI 를 일정한 band내에 유지시키는 CAOC운전은 OT Δ T 및 OP Δ T 設定值가 最大 값을 가지게 되어 原子爐 停止 可能性은 最小가 되게 된다.

다. Mode A運轉方式의 限界 및 단점

Mode A 運轉方式은 負荷追從運轉中 最大 安全餘裕度を 確保할 수 있는 長點을 갖는 反面에 制御棒의 核的, 機械的 特性, 硼酸系統의 爐心 硼素濃度 調節能力 등에 依하여 다음과 같은 運轉上의 限界를 갖게 되어 경우에 따라서는 負荷

追從運轉能力을 잃게되며 또한 막대한 發電所 利用率의 저하를 超來할 우려가 있다.

(1) 爐心 末期(EOL)의 負荷追從

그림 9는 12-3-6-3의 日日 負荷사이클로 出力을 정격의 50% 增減發할때 燃燒度에 따라 하루에 발전소 Evaporator가 處理해야할 냉각 재량을 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 爐心末期로 가면 硼素濃度의 減小와 出力缺損(Power defect)의 增加로 出力調節을 위한 냉각재의 硼酸系統으로의 放出量이 급격히 增加한다. 따라서 發電所의 Evaporator의 處理能力에 따라서 약간의 차이는 있겠지만 대개 70%의 연소도 이후에서는 Evaporator 處理能力의 限界로 원하는 日日 負荷追從運轉이 곤란하게 된다.

(2) Spinning reserve capacity

Spinning reserve capacity는 爐心の 出力變動 設計限界인 5%/분의 빠른 速度로 爐心出力을 增發시킬 수 있는 發電所의 能力을 말한다. 이렇게 빠른 속도의 出力증발 요구는 부하추중 운전중 電力系統(Grid)의 事情에 依해 發生할 수 있으며, 이 경우 全出力까지 最大 速度로 出力 增發이 이루어지지 않으면 發電所의 利用率(Capacity factor) 측면에서 많은 損失을 超來하므로 負荷追從運轉 發電所의 Spinning Reserve Capacity는 重要한 意味를 갖는다.

Mode A 운전 發電所의 出力제어용 제어봉은 제어봉 인출사고, 정지여유도(Shut down margin) 등을 고려하여 설정된 제어봉 인입한계(rod insertion limit) 및 ΔI 를 target band에 유지해야 하는 관계로 爐心 깊숙이 引入되지 못하므로 Spinning Reserve Situation에서 그림10에 나타난 바와 같이 제어봉을 이용한 빠른 出力복귀가 全出力까지는 不可能하다. 그림에서 8 Rod D-Bank線은 既存 發電所의 一般的인 Spinning reserve capacity(약 20% 증발)를 보여주고 있으며, 나머지 두 線은 앞으로 설명할 부하추중 能力을 향상시킨 發電所의 Spinning Reserve

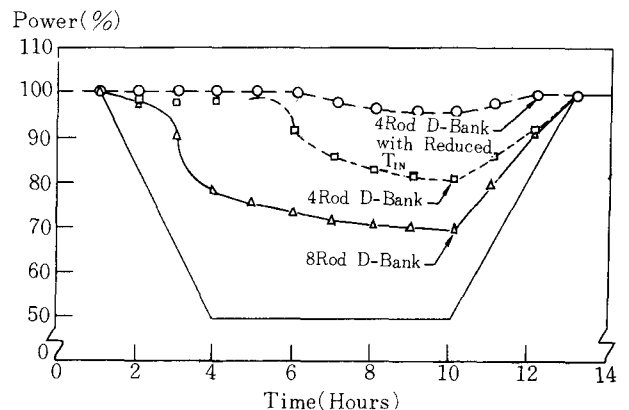
Capability를 나타내고 있다.

이러한 狀態에서 나머지 全出力까지의 出力 복귀는 硼酸稀釋에 依存해야 하는데, 이때의 最大로 可能한 出力 增發率은 燃燒度에 따라 다르지만 제어봉과 비교할 수 없을 程度로 낮다(爐心 末期로 갈수록 爐心の 硼素濃度 감소로 더욱 낮아짐).

(3) 周波數 制御(Frequency Control)

지금까지 주로 日日 負荷追從運轉(daily load follow operation)에 관해서 論議해 왔으나, 그 외 부하추중운전으로 周波數 制御運轉이 있는 바, 이는 다시 中央給電指令所에서 순간 순간 變하는 負荷의 調節을 위해 一定한 時間間隔으로 그 조절량을 系統에 물려 運轉中인 各 發電所에 配分하게 되는데, 이에 따르는 remote frequency control(or load regulation)과 豫想하지 못한 電力系統의 瞬間的 周波數 低下에 應動하기 위한 目的의 local frequency control로 나눌 수 있다. Mode A 運轉方式은 software 的인 側面에서는 두가지 경우 모두 1%/분의 出力變化率로 全出力의 $\pm 3\%$ 범위내에서 可能하다. 實際 미국의 Zion 1 原子力發電所에서는 이러한 周波數 制御에 관한 試驗運轉을 實施하였으며, 그 結果 아무런 問題點도 發見되지 않았다. 그러나 周波數 制御運轉은 制御棒의 頻頻한 作動으로 제어봉구동장치 및 제어봉 자체에 심한 마모현상을 일으키는데, 프랑스의 제어봉 마

<그림 10> Spinning Reserve Capacity



모시험결과 특히 제어봉의 被覆材에 마모로 인한 구멍이 뚫리는 現象이 發見되었다. 그러므로 既存 제어봉 제어시스템으로는 周波數 制御運轉은 어려운 것으로 생각된다.

(4) 其他 運轉上의 短點

기타 Mode A의 運轉上의 短點으로는 出力을 조절하거나 이로 因한 지-논과도상태 유발시 항상 ΔI 가 target band 내에서 制御되게 하기 위하여 運轉員이 항상 注意를 기울여야 하고 또한 처리해야 할 放射性物質이 많이 生産된다는 점을 들 수 있다.

3. 冷却材 溫度減小 運轉方式과 限界

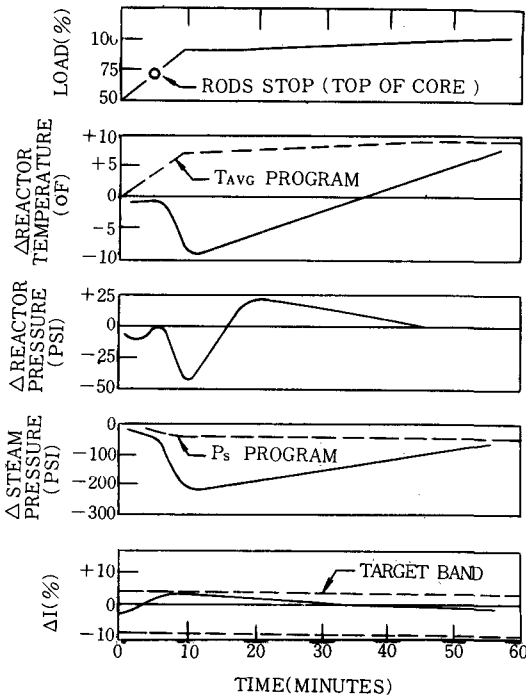
가. 冷却材 溫度減小 運轉 概念

爐心 末期의 負荷追從, spinning reserve capacity 및 周波數 制御 問題 等 앞에서 指摘한 Mode A 運轉方式의 限界點을 緩和시킬 수 있는 方法으로 必要에 따라 冷却材의 溫度를 낮추어 運轉하는 冷却材 溫度減小 運轉方式이 提案되었다. 이 方式의 基本概念은 減速材의 溫度를 減

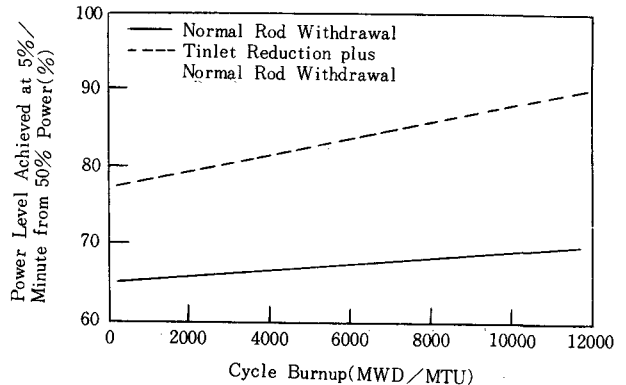
소시키면 爐心に 陽의 反應度가 引入되어 ΔI 에 크게 影響을 미치지 않고, 제어봉에 의한 것과 같이 빠르게 爐心出力을 증가시킬 수 있다는 點에 있다. 그림11은 Mode A 運轉中 50% 出力에서 5%/分の 出力 增發이 要求되는 spinning reserve situation이 發生하여 제어봉이 모두 引出될 때까지 제어봉을 이용 5%/分으로 出力을 증발시키고, 이후 냉각재 온도 감소와 硼素濃度稀釋을 併行하여 같은 속도로 90%까지 出力을 增加시킨후 硼素濃度만 最大限으로 制御하여 나머지 10%를 담당케하여 全出力으로 복귀시키는 과정에서 나타난 중요운전인자들의 변화모양이다. 이렇게 냉각재 온도를 감소시킴으로써 ΔI 를 band내에 유지시키면서 Spinningreserve capacity를 70%에서 90%까지 增加시킬 수 있다. 이러한 spinning reserve capacity의 증가는 노심 말기로 갈수록 감속재 온도계수가 더욱 큰 부(負)의 값을 갖게되어 더욱 더 크게 나타나는데 그림12는 이런 현상을 잘 묘사하고 있다.

Mode A 운전중 노심 말기에서 Evaporator의 처리능력 이상의 냉각재 effluent가 生産되는 시점에서 냉각재 온도 감소 운전을 併行하면 出力 상승을 위한 硼素濃度稀釋 부담이 줄어 부하중운전을 연장할 수 있고 또한 現在의 제어봉 제어신호($T_{ref} - T_{avg}$)의 Dead Band(1.0~1.5°F)를 확장시킴으로써 제어봉의 作動없이

〈그림 11〉 Reduced Temperature Return to Power Transient



〈그림 12〉 Typical Return to Power Capability with Tinlet Operation



어느 程度의 周波數 制御運轉이 可能하므로 온 도 감소 운전방식으로 周波數制御運轉에 利用 할 수도 있다.

나. 冷却材 溫度減小 限界

冷却材의 온도를 正常的인 設計溫度보다 낮게 운전하는 경우 다음 두가지 문제에 의해 낮출 수 있는 온도의 제한을 받게 된다.

(1) 증기발생기 습분 Carry over

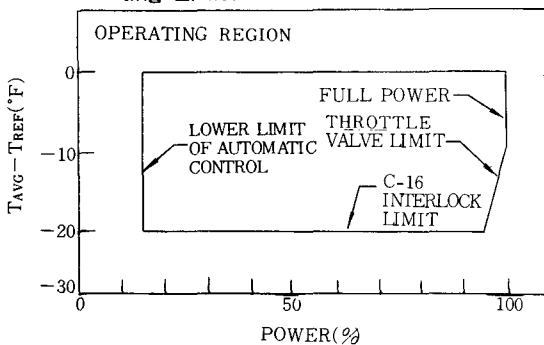
터빈 브레이드의 부식을 방지하기 위하여 주 증기의 습분함량을 일정량 이하로 제한하는데, 대개 0.25%가 그 제한치이다. 냉각재 온도를 설계온도이하로 운전하면 주증기의 포화증기압 이 감소하여 증기의 습분함량이 많아진다. WH의 ILFP (Imporved Load Follow Package)발전소는 정상온도 -20°F(C-16) 까지 운전이 許容된 다.

(2) 터빈 Throttle 밸브 한계

냉각재 온도감소 운전을 하면 주증기의 壓力 이 감소하므로 정상온도 운전시와 같은 출력을 생산하기 위하여 터빈 throttle 밸브는 더 많이 열려야 한다. 계속 온도는 감소시키면서 일정한 출력을 낼려고 하면 어느 점에서 throttle 밸브 가 完全 개방되어 더 이상의 온도 감소가 불가능해진다.

이상 두가지 한계를 고려하여 만들어진 온도 감소 운전한계가 그림13이다. 그림에서 최대감 소 가능 온도는 20°F인데, 이는 대개 20%정도 출력을 상승시킬 수 있는 正反應度效果를 갖는다.

<그림 13> Typical Reduced Temperature Operating Limits



4. 기타 Mode A 能力向上設備 및 核設計 概念

여기서는 MOD A 能力向上을 위하여 우리나라 가압경수로에 기설치된 설비 및 核設計概念 에 대해 간단히 알아 보기로 한다.

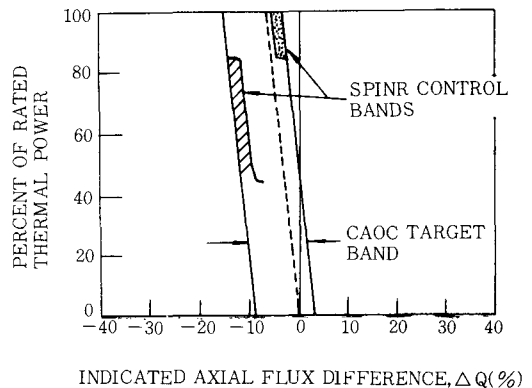
(가) BTRS (Boron Thermal Regeneration System)

BTRS는 硼素濃度에 따라 硼素의 석출 온도 가 다른 原理를 利用한다. 必要에 따라 冷却材 를 추출하여 일련의 resin bed demineralizer 를 통과시켜 다시 원자로 冷却系統으로 되돌려 주는 과정에서 demineralizer의 온도를 변화시 키면 resin beb에 硼素가 흡입되거나, 反對로 석출되므로 노심 붕소농도를 어느 程度 조절할 수 있다. 따라서 Mode A 방식에 의한 부하추중 운전시 既存 붕산화수계통(BRS)과 併行해서 B TRS를 使用하면 운전중 發生하는 냉각재의 effluent를 줄일 수 있다. 이는 특히 爐心 末期의 부하추중운전한계를 緩和시키게 되고 또한 계속 적인 붕산첨가 稀釋을 위한 운전원의 수고를 다 소 덜어주는 역할도 한다.

(나) 제어봉 D뱅크 재설계

3-Loop WH PWR의 제어봉 D뱅크는 원 래 그룹 1, 2에 각각 4개씩 총 8개의 RCCA (Rod Cluster Control Assembly)로 構成되어 있었으나, 부하추중을 고려 그룹 2의 4개의 R CCA를 정지뱅크(Shut down bank)로 옮기고 나머지 4개의 RCCA만 出力제어용 D뱅크로 이

<그림 14> Typical SPINR Control Band



용도록 하였다. 이러한 설계변경으로 같은 ΔI band를 유지하면서도 제어봉이 爐心에 깊게引入할 수 있도록 하여 그림10에서 보는 바와 같이 Spinning Reserve Capacity를 向上시켰으며, 아울러 半徑方向 침투계수의 감소로 안전여유도를 증가시켰다.

(다) Target Band의 擴大

P/L 제어봉에 의한 局所 측방향 침투계수가 증가하는 현상을 고려하여 設定되었던 $\pm 5\%$ Band를 P/L 제어봉의 完全 제어로 $-12, +3\%$ Band로 확대시킬 수 있어 부하추중운전의 flexibility를 增加시켰다.

(라) 核設計時 SPINR 運轉方法 考慮

核設計時 과거에 고려했던 CNTR 대신 Spinning Reserve를 最大로 하기 위한 SPINR 運轉方式을 考慮하여 FAC分析을 遂行하고 있다. SPINR 運轉方式은 그림14에 나타나있는 Target band內的 사선부분에 ΔI 가 存在하도록 운전하는 것으로서, 저출력에서는 可能한한 제어봉을 깊이引入함으로써 그만큼 제어봉에 의한 出力增發能力이 커져 Spinning Reserve Capacity가 좋아진다.

IV. 加壓輕水爐의 改善된 負荷追從運轉方法

1. 프라마툼(佛)의 接近方式

미국 WH의 PWR기술을 傳受받은 프라마툼은 自國內 原子力發電의 負荷追從運轉의 必要性을 오래전부터 認識하여 미국 WH의 Mode A보다 훨씬 부하추중 能力이 뛰어나고 運轉 flexibility가 좋은 Mode G 運轉方式을 개발하여 實際 운전에 적용하고 있는데, 그 基本概念은 反應도가 낮은 gray rod assembly를 出力제어의 目的으로 사용함으로써 노심 引入·引出에 따른 出力分布의 變化를 最小化하는데 있다. 이렇게 함으로써 Mode A의 target band 보다 훨씬 넓은 運轉領域을 確保할 수 있었다.

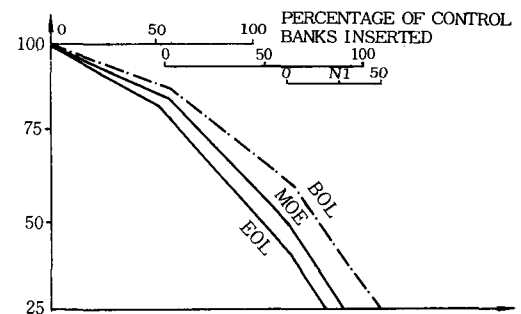
가. Mode G 運轉

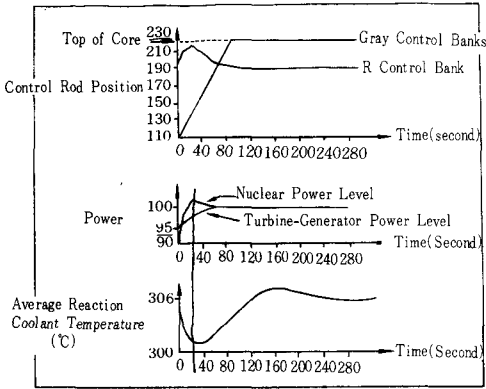
Mode G 運轉時(그림15)와 같이 터빈出力에 따라 反應도가 낮은 gray bank (400~1100pcm)의 位置는 固定된다. 그러나 이러한 gray bank의 位置만으로는 터빈出力 증가에 따른 원자로 출력 증가가 充分하지 못하므로 냉각재 온도 감소현상이 일어나는데 이때 反應도가 높은 block rod assembly로 구성된 R bank (1200pcm)가 터빈출력을 代表하는 Tref와 냉각재 평균온도 Tavgl차이에 따라 작동하여 Tavgl를 Tref와 같게 조절해 준다. 그림16에서는 이러한 운전결과가 잘 예시되어 있다.

Mode G 運轉을 위하여 프라마툼에서는 당초 모든 제어봉이 black rod assembly로 되어 있던 것을 일부 gray rod assembly로 설계를 變更하였는데, 3-loop의 발전소의 경우 gray rod assembly는 기존 block rod assembly의 24개의 Ag-In-Cd 봉중에서 16개를 중성자 흡수 단면적이 작은 stainless steel 봉(gray rod)으로 교체되었다. 따라서 control rod pattern도 기존의 5개의 spare assembly를 모두 活用하는 등 많이 달라져 있다.

Gray bank도 그림15에서와 같이 overlap되어 제어되나, 원자로내 挿入限界는 별도로 설정되지 않고, A.O가 가장 적어지도록 insertion control function에 의해 터빈출력에 따른 gray bank의 爐心 位置가 定해진다. 그러나 block rod로만 구성된 R-bank는 기존 제어方法과 마찬가지로 insertion limit가 결정되고 Tref와 Tavgl의 차이에 의해 동작한다.

<그림 15> Insertion of gray control as a function of the power level





- Gray Control Assemblies
- coolant Temperature
- Control Rod Assembly
- ⊗ Shutdown Rod Assembly

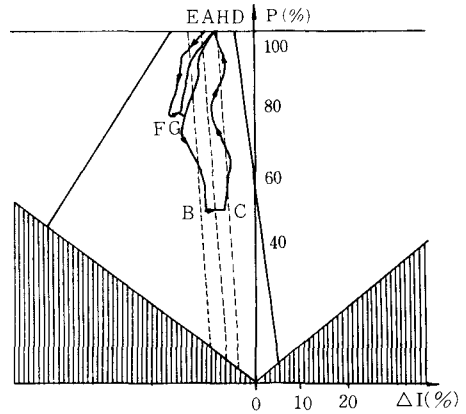
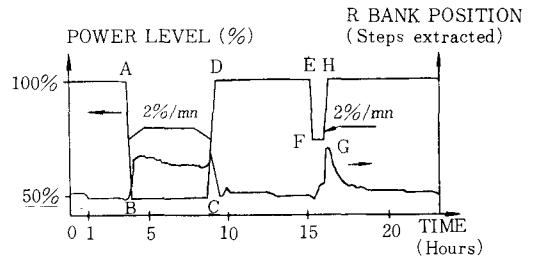
〈그림 16〉 Typical mode G load step

Mode G는 反應度가 작은 제어봉을 출력제어용으로 사용하게 됨에 따라 제어봉을 노심 깊숙이 插入하여도 반경 혹은 축방향 출력분포에 미치는 영향이 작아 Mode A에 비해 훨씬 넓은 運轉領域을 확보할 수 있다.

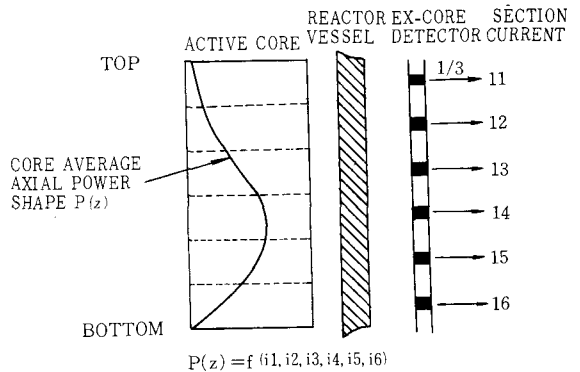
表 2 에는 Mode G의 부하추종운전 flexibility가 Mode A의 그것과 비교되어 있고, 그림 17 에는 Mode G로 하루에 2 번에 걸쳐 일일부하추종운전을 했을 때의 ΔI 변화에 대한 시험 결과를 보여주고 있다.

Mode G 運轉方式은 일일부하추종운전과 周波數 제어운전을 同時에 할 수 있는 기능을 갖고 있다. 周波數 제어운전시의 잦은 제어봉 인출입에 따른 기존 제어봉 제어기구의 마모현상에 관한 시험이 "Superbec" test loop에서 수행되어 제어봉의 피복재가 마모에 의해 구멍이 뚫리는 현상이 발견된 것 외는 다른 문제점은 없었다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 피복재의 표면에 Chromium-carbide hard facing 처리를 하고 RCC 안내관의 내부 모양을 변경하여 水力學的 影響을 덜받게 하였으며, 이렇게 補完된 제어봉을 다시 시험해 본 결과 이상이 없었다.

〈그림 17〉 Load follow test



〈그림 18〉 Measurement of axial power distribution



그밖에 出力變動運轉에 따른 核燃料 被覆材의 피로문제, PCI문제 등에 대한 많은 실험 결과 그 安定性이 立證되어 Mode G 운전발전소는 프랑스 인허가 당국으로부터 1983년에는 일일부하추종 이어서 1984년에는 주파수 제어운전에 대한 허가를 득하였다.

나. Integrated Digital Protection System (IDPS)

〈表 2〉 Comparison the mode G lode follow capability with mode A

GRID DEMAND		MODE A	MODE G
LOAD FOLLOW	Power range (% of rated power)	Between 30 and 100%	Same
	Variation rate (% of rated power/mn)	0.3%/mn	Up to 2%/mn daily
SPINNING RESERVE	Amplitude and rate of power increase	+15 to 20% at 5%/mn Rate of further power increase limited by dilution	Return to full power at 5%/mn
FREQUENCY CONTROL	Automatic (local) frequency control Power range	± 3 %	Same
	Load regulation (remote frequency control) Power range	± 3 %	± 5 %
	Variation rate	1%/mn	Same

爐心の安全限界를 지키면서 더 많은 運轉上의 融通性(flexibility)을 확보함으로써 負荷追從 運轉能力을 더욱 向上시킬 수 있다. 이러한 觀點에서 프라미툼에서는 여러가지 保守의인 方法을 利用하여 安全餘裕度를 考慮, 事前에 固定된 운전한계에 얽매이지 않고 狀況에 따라 그 시점에서 測定된 安全因子를 利用하여 最大의 운전한계를 확보하게 하는데 利用할 수 있는 IDPS (integrated digital protection system)를 개발하여 4-loop 발전소에 적용하고 있다.

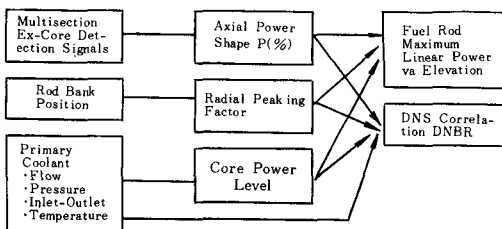
IDPS의 주요 point는 기존 two-section 출력영역 核計測器를 그림18과 같이 six-section으로 교체하여 노심의 해당 부위의 出力을 測定 수학적 algorithm을 利用, 축방향 출력분포를 운전중 연속적으로 계산하여 축방향 침투 계수를 생산하고, 기타 운전중 항상 計測되는 제어봉위치, 냉각재 온도, 壓力, 유량 등을 필요

한 것끼리 그림19와 같이 合成하여 Fq 및 DN BR을 항상 測定함으로써 安全餘裕度를 운전원 이 알 수 있도록 한 것이다. 6-section 炉外 核計測器에 의한 계산결과와 노내 핵계측기에 의한 계측결과를 비교하면 서로 잘 一致한다. 이러한 시스템을 부하추종운전에 이용하면 Grid의 要求를 보다 원활하게 충족시킬 수 있을 것으로 생각된다.

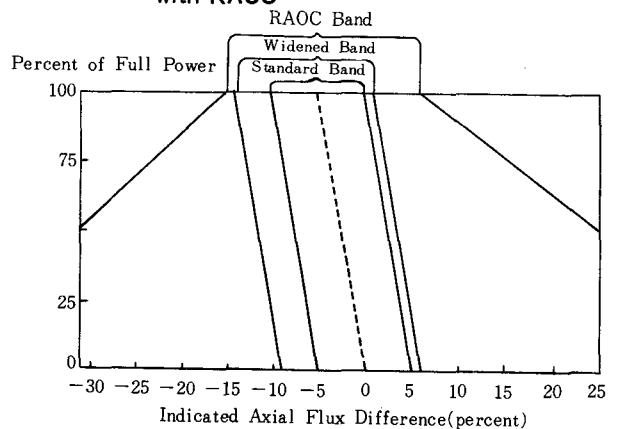
2. WH (美)의 接近方法

IV章 4節에서 紹介한 Mode A 運轉能力 向上을 위한 개선사항의 WH에서는 프라미툼의 接近方式과 비슷한 RAOC 및 MSHIM 運轉方法을 개발하였으며, 기타 부하추종운전 能力을 向上

〈그림 19〉 Physical core conditions, computational principle



〈그림 20〉 Example of Band Widening Possible with RAOC



시키기 위한 여러가지 부속설비들을 개발, 부하 추종운전이 요구되는 일부 발전소에 적용하고있다.

가. RAOC (Relaxed Axial Offset Control)

CAOC에 의한 運轉方法은 지-논진동을 最大限 抑制하기 위하여 出力에 關係없이 ΔI band를 너무 嚴格하게 設定함으로써 부하추종운전이 要求될때 Mode A에서 설명한 바와 같이 운전 flexibility가 좋지 않다. 이러한 단점을 補完하기 위하여 WH는 그림20과 같이 저출력으로 갈수록 운전범위가 점차 넓어지는 RAOC 운전방식을 제안하였다. 정상운전중 지켜야 할 LOCA Fq제한치는 출력에 관계없이 一定한 線出力密度(KW/ft)를 갖는다.

따라서 爐心 出力이 감소하면 그만큼 ΔI Band가 넓어져도 LOCA 제한치를 여전히 만족시킬 수 있으므로 저출력으로 갈수록 운전 flexibility를 增大시킬 수 있다는 것이 RAOC 基本概念이다. 實際로 RAOC는 CAOC의 경우 ΔI band를 먼저 설정하고 Fq, DNB 등이 안전한계에 들도록 핵설계를 하는 반면, 기 설정된 안전

한계에 맞추어 ΔI band를 결정하는데, ΔI band 결정과정에서 지-논의 제어에 관한 고려가 嚴格하게 이루어지지 않음으로 인해 부하추종운전 도중 저출력에서 지-논 分布가 너무 下半部 노심쪽으로 치우쳐 ΔI band를 지키면서 全出力으로의 복귀가 不可能할 경우가 發生할 수 있다.

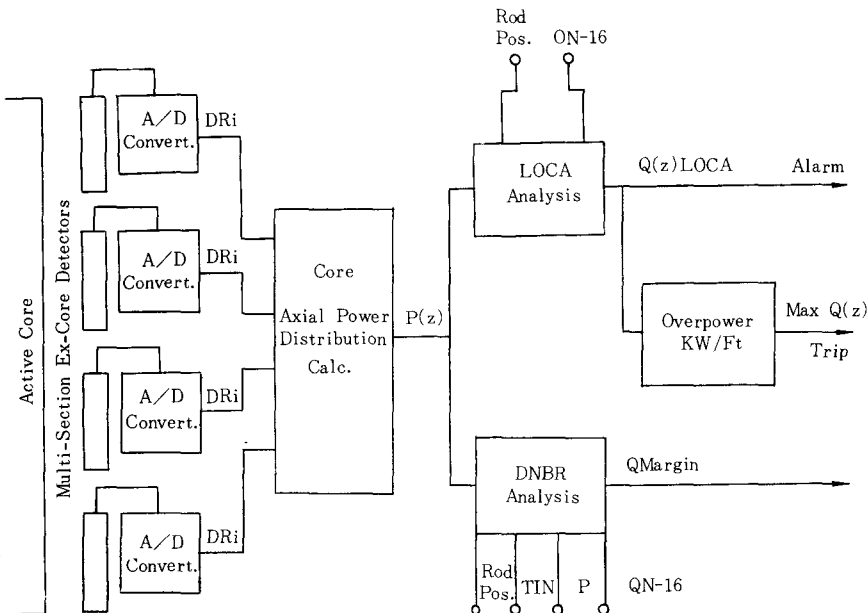
그러나 RAOC의 장점은 ΔI band의 확대로 출력변동시 제어봉의 이용도가 높아 출력 증감발을 빠른 속도로 할 수 있다는 점이다. 실제적으로 Load Follow Package (4 rod D Bank와 냉각재온도감소운전)를 갖춘 발전소는 RAOC 방식을 使用하면 18-6사이클 운전이 가능하다 (CAOC 방식으로는 不可能함). 또한 spinning reserve capacity도 증가한다는 이점이 있다.

그밖에 RAOC 운전방식이 채택되면 출력제어에 주로 제어봉을 사용함으로써 냉각재의 effluent량을 감소시킬 수 있고, 원자로 정지후 재기동운전이 간편해지며 운전원의 운전부담도 줄일 수 있다.

나. MSHIM (Mechanical Shim Rods)

WH는 spinning reserve capacity를 向上시

<그림 21> The Scheme of Production DNBR, KW/f Signal



키기 위한 目的의 Load Follow Package (4 rods D Bank plus 냉각재 온도감소 운전)와 운전 Flexibility 확대를 위한 RAOC 운전방식을 개발하였으나, 보론회석능력 부족으로 인한 노심 말기의 부하추종운전한계문제는 여전히 남게 되었으며 또한 spinning reserve capacity도 완전히 해결된 것은 아니었다. 이 두가지 문제를 해결하기 위한 방법으로 硼酸系統의 역할을 제어봉으로 補助할 수 있도록 한 MSHIM 概念을 提案하였다. MSHIM은 프라마툼의 Gray rod와 유사한 制御概念으로써 反應도가 작은 Light shim과 反應도가 큰 Heavy shim으로 構成되어 Light shim에 의해 축방향 출력분포가 개선되어 깊이 인입을 허용함으로써 全出力 spinning reserve가 가능하며, 전 노심주기를 통하여 부하추종운전이 가능하도록 설계되었다.

다. 기타 부하추종 向上을 위한 부속설비

WH는 전술한 RAOC 및 MSHIM 외에 부하추종운전 flexibility를 增大시키고 또한 운전중 지는과도현상 등의 감시를 위하여 개발한 다음과 같은 설비에 대해서 간단히 알아보기로 한다.

(1) IPS/ICS (Integrated Protection System/ Integrated Control System)

IPS는 프라마툼의 IDPS와 유사한 설비로서 그 主目的은 운전중 DNBR 및 Fq를 연속적으로 測定함으로써 간접적이고도 보수적인 DNB 및 핵연료 용융보호 원자로 정지신호인 OT Δ T, OP Δ T 신호를 직접적인 DNBR과 kW/ft에 의한 신호로 대체함으로써 運轉餘裕度를 增大시켜 負荷追從과 같은 過渡狀態時의 運轉 flexibility를 增大시키자는데 있다. 이를 위해 既存 發電所에는 다음과 같은 hardware의 설치가 必要하다.

- (가) N-16 出力監視器
- (나) Fast response cold leg RTD
- (다) Protection grade RPI system
- (라) Multi-section excore detectors
- (마) DNBR and KW/FT calculator

(바) Peaking factor monitor

이러한 설비를 이용 DNBR 및 kW/ft 보호원자로 정지신호 生成도가 그림21에 나타나 있다.

ICS는 부하추종운전시 출력분포제어 및 爐心 崩산농도제어 등을 모두 자동화한 설비로서 出力分布가 항상 安全限界內에 들도록 하고 필요에 따라서 崩산자동조절 및 냉각재 온도에 따른 反應度 效果를 이용, 제어봉의 위치가 적절하게 유지되도록 한다. 또한 爐心에 要求되는 최적 崩산농도를 계산하여 BTRS/BRS가 작동되도록 함으로서 냉각재 effluent를 최소화시킬 수 있는 등 부하추종운전을 편리하고도 안전하게 할 수 있도록 해주는 설비이다.

(2) COSMOS (Core On-line Surveillance Monitoring and Operations System)

COSMOS는 運轉中 實時間(real time)으로 運轉員에게 爐心出力分布, 安全餘裕度 그리고 運轉可能範圍 등을 알려주는 機能을 갖고 있으며 또한 運轉狀態나 出力의 變動에 의해 豫想되는 爐心 및 系統의 變化狀態를 豫測하는 機能도 함께 갖고 있다. 따라서 이러한 機能을 利用하면 負荷追從運轉을 좀더 flexible하게 할 수 있다. 특히 RAOC 운전인 경우 운전 band의 확대로 운전중 경우에 따라서는 지-논진동현상이 發生할 수도 있는데, 지-논모드제어 scheme에 의해 이를 사전감시, 운전원으로 하여금 적절한 對應을 할 수 있게 해 줌으로서, RAOC운전을 원활하게 해 주기도 한다.

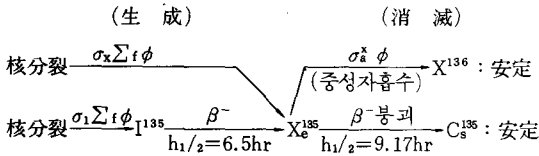
V: 負荷追從運轉에 따른 지-논過渡現象

지-논은 核分裂에 의해 生成되는 物質로서 그 生成率도 가장 크고(F.Y=6.3%) 중성자 흡수단면적도 대단히 커서(2.7×10^6 barn) 爐心の 反應度制御에 至大한 影響을 미친다. 평형상태에서의 지-논은 爐心 中性子束에 따라 一定한 分布를 갖지만 어떤 外亂에 의해 중성자속의 모양이 변하면 지-논도 따라 변화하는데 이때 중성자속과 지-논이 서로 영향을 미쳐 出力이 진

동하는 결과를 초래한다. 이러한 출력진동은 緩慢한 지-논변화에 의해 서서히 일어나고 대개의 경우 시간이 경과함에 따라 진동폭이 줄어들어 다시 평형상태의 중성자속과 지-논상태가 유지된다. 그러나 노심의 특성 및 출력변동의 상황에 따라 지-논진동이 發散하는 경우가 생길 수 있는데, 이렇게 되면 출력제어에 상당한 困難을 겪게 되고 最惡의 경우 원자로가 정지되게 된다. 특히 부하추종운전의 경우 주기적 혹은 수시로 일어나는 출력변동에 의해 지-논진동이 항상 발생하게 되므로 이러한 진동이 발생하지 않게 하는 운전방식이 요구되며, 이러한 目的에 충실한 운전방식이 CAOC 부하추종운전 (Mode A) 技法이다.

1. 지-논의 生成 및 消滅

지-논은 爐心 核分裂에 의해 다음과 같은 scheme 을 갖고 生成, 消滅한다.



운전중 지-논은 대부분인 그 先行核인 Iodine-135에 의해 生成되는데 출력변동이 변동하면 중성자속(φ)의 변화 및 Iodine과 지-논의 반감기의 차이에 의해 출력변화에 따른 지-논변화가 일어난다. 지-논은 출력이 감소하면 그 양이 증가했다가 감소하여 새로운 출력에 대한 평형을 이루는데 그 최고치에 도달하는 시간이 출력변동후 9~11시간, 새로운 평형에 도달하는 시간은 약 40시간이 소요된다. 지-논의 변화량은 출력변동폭에 좌우되므로 같은 출력을 감발하더라도 단계적 감발이 지-논의 변화를 적게 하는데 效果가 있다.

2. 지-논진동 제어방법

노심의 중성자속은 위치와 시간에 따라 다른 값을 갖는다. 그러나 일정한 출력에서 평형에 도달하면 중성자속은 위치에 따라 一定한 분포를 갖게 되는데, 대개 노심의 축방향으로는 Cosi-

ne shape을 갖게 되고 반경방향으로는 1차 Bessel 함수에 따른 분포를 하게 된다. 이러한 평형상태의 노심에 제어봉을 이용하여 출력을 변화시키면 제어봉의 위치에 따라 축방향 및 반경방향의 출력분포 모양이 달라진다. 노심설계시 반경방향의 출력분포는 제어봉의 반경방향의 적절한 배치, 동작 sequence, 가연성 독물질(burnable poison)의 사용 등으로 제어봉이 인입 인출되어도 크게 그 모양이 변화하지 않도록 설계되어 있으므로 출력변화에 따른 지-논진동은 거의 문제가 되지 않는다.

그러나 축방향의 출력분포는 제어봉의 인입도가 크면 클수록 허부방향으로 치우치므로 이에 따라 노심 상하부의 중성자속과 지-논변화의 불균형으로 인한 축방향 출력진동이 發生하게 된다. 이러한 출력진동현상은 전적으로 지-논의 상하부 변동에 기인하므로 지-논이 發散하거나, 發散은 하지 않더라도 너무 심한 진동에 의하여 상하부 출력편차가 운전한계를 벗어나지 않도록 지-논 상하부 과도현상에 대한 적절한 제어가 이루어져야 한다. CAOC에 의한 운전시 CACO band를 벗어날 정도의 심한 상하부 지-논진동이 發生하지 않도록 설계되었으므로 band내에 A.O가 유지되도록 운전하면 지-논이 진동하더라도 시간이 경과함에 따라 안정을 찾게 되는데, 이러한 方法을 direct offset control이라고 부른다. 그러나 이 方法은 지-논의 평형에 도달하는 시간이 느리고 연료의 연소, 노심의 크기 등 특성에 따라 지-논진동이 심해지거나, 발산하는 경우 적절하지 못하므로 다음과 같은 방법이 그 진동을 신속히 제어하는데 사용될 수 있다.

가. Overstressed Offset Control

이 方法은 빠른 시간내 지-논이 평형상태에 도달되게 하기 위하여 CAOC target band外에 일정시간 상하부 출력편차 A.O가 머물 수 있다는 Tec. Spec. 사항에 의거 제어봉과 봉산계통을 함께 사용하여 출력을 일정하게 고정시키고

A. O를 조절함으로써 X. O (Xenon offset : A.O와 같은 概念)을 빠른 시간내 평형에 도달하게 한다.

나. First Overton Control

Overstressed offset control과 같은 概念이나 진동의 폭이 크지 않을때 제어봉을 사용함으로써 보다 빠른 시간내 效果的인 결과를 얻을 수 있다.

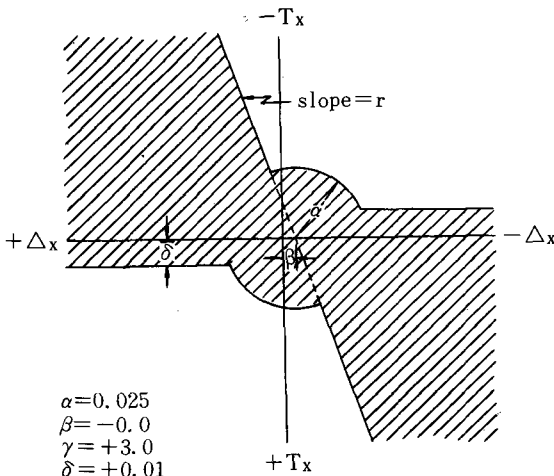
다. Bang - Bang Control

큰 폭의 지-논진동을 신속히 제어하기 위하여 사용되며, CAOC 운전범위내 ΔI 를 유지하기는 困難하나 매우 效率的이다. 즉, 2번의 짧은 시간을 통하여 적절한 제어봉의 움직임으로 지-논을 평형치에 즉각 도달할 수 있게 한다.

라. RAOC시의 지-논제어

엄격한 지논제어 目的으로 설정된 CAOC Band에 비해 RAOC은 그band가 훨씬 넓어 상하부 출력편차가 상당히 커지는 것을 허용하므로 출력변동시 심한 상하부 지-논진동 현상을 초래할 가능성이 커진다. 따라서 RAOC에서는 기존노의 중성자 추정기와 부속 계통을 통하여 얻어진 X.O 및 시간에 따른 X.O 변화율을 계산하여 그림22와 같은 사선부분의 지-논 안전영역으로 돌아오도록 제어한다. WH에서는 그들의 COSMOS의 지-논모드제어를 통하여

<그림 22>



이러한 지-논현상을 할 수 있도록 되어 있고, 이를 ICS와 연결, 제어봉 및 BRS가 자동제어 되도록 하고 있으며, 프라마툼은 그들의 Mode G를 위해 ΔI 가 존재하도록 자동봉산주입 및 희석이 가능한 Sycobor system을 개발·사용하고 있다.

IV. 結 言

이상에서 原子力發電所의 爐心の 特性에 의거한 負荷追從運轉限界 및 보다 개선된 負荷追從을 위한 새로운 運轉方法 및 이를 위한 hardware變更 및 새로운 設備의 개발, 爐心設計 概念의變更 등을 一般的으로 考察하였다. 우리나라의 WH제공 加壓輕水爐는 KNU1을 除外하고는 모두 既存 CAOC 負荷追從運轉方式에 低出力에서 Grid의 緊急出力復歸要求에 對應하는 spinning reserve capacity를 向上시키기 위한 target band의 확장, BTRS, 核設計時 CNTR 代身 SPINR 方法適用 등의 概念이 適用된 發電所로서 基本的으로는 日日負荷追從能力을 갖고 있는 것으로 판단된다.

그러나 實際的으로 負荷追從運轉을 實施하기 위하여는 software的으로는 우리나라 負荷 Pattern을 定立하여 거기에 맞는 日日負荷追從運轉을 할 수 있는 運轉方式이 제시되어야 하겠으며, 周波數制御運轉은 제어봉구동장치 및 제어봉 자체의 機械的 特性, 잦은 출력변동에 따른 加壓器 壓力制御, 증기발생기 수위제어 등 제어 계통에 미치는 영향 등이 充分히 檢討되어야 할 것이다. 그리고 보다 flexible한 負荷追從 能力을 確保하기 위하여는 개선된 負荷追從運轉 methodology의 도입이 요구된다. 이렇게 함으로써 Grid의 安定度를 向上시켜 良質의 電力供給에 寄與할 수 있을 것으로 믿어진다.

◇-◇