

# 이것부터 시작되는 BRS 및 BTRS에 미치는 영향

姜 德 遠

(韓電技術研究院 原子力研究室 先任研究員)

## I. 序 論

原子力發電 占有率의 증가와 함께 基底負荷 運轉 뿐만 아니라 일일 최저전력수요 시간에는 尖頭負荷까지 담당하게 됨으로써 原子力發電所의 負荷追從運轉이 점차 요구되어 오고 있는 실정이다. 부하추종운전(12-3-6-3)을 위해 보통 100%-50%-100% 출력변화를 선택하고 있으며, 이러한 부하추종운전시 반응도변화를 보상해 주기 위해 崩산주입 및 희석(Boration/dilution)이 요구되어지며, 희석시 생성되는 放射性流出物은 가능한한 외부로 방출됨이 없이 全量系統으로 회수되어야 한다.

이러한 희석 유출수는 崩산회수계통(Boron Recovery System) 및 崩산열재생계통(Boron Thermal Regeneration System)을 통하여 처리되어지는데 향후 부하추종운전시 현재 보유하고 있는 각 발전소의 設備容量으로 처리가능한지의 여부와 현 설비의 사용상의 문제점을 파악하여 이러한 계통이 부하추종운전에 미치는 영향을 검토하고자 하였다.

## II. 本 論

### 1. 各 發電所 設備保有 現況

#### 가. 號機別 BRS 및 BTRS 設備保有容量

계통	호기별	원자력 1 호기	원자력 2 호기	원자력5, 6 호기	원자력7, 8 호기
계통수 제적		186톤	182톤	252톤	5, 6호기와 동일
BRS	Hold up Tank	54,500GAL ×2대	32,000GAL ×2대	114,000GAL ×2대	"
	Boron Recycle Evaporator	15GPM ×2대	15GPM ×1대	15GPM ×1대	"
	Condensate Storage Tank	4,000GAL	없음	없음	"
BTRS	Anion Demineralizer	없음	561GAL ×3대	561GAL ×4대	"

#### 나. 號機別 放射性廢液 處理系統(LRS) 設備保有容量

계통	호기별	WASTE HOLDUP TANK	WASTE EVAPORATOR	WASTE CONDENSATE TANK
원자력 1 호기		17,000GAL	2GPM×1대 15GPM×1대	1,000GAL×3대
원자력 2 호기		11,400GAL	15GPM×1대	52,500GAL
원자력 5, 6 호기		LOW TDS HOLD UP T: 34,900GAL×1대, HI TDS HOLD UP T: 34,900GAL×2대	30GPM×2대	34,900GAL×2대
원자력 7, 8 호기		5, 6호기와 동일	"	"

### 2. 系統運轉(System Operation)

#### 가. 硼酸回收系統

##### 1) 要 概

崩산회수계통은 기능상 爐冷却水 制御系統의 일부분이라고 할 수 있다. BRS의 용량은 원자력발전소 부하추종운전에 직접적인 관련이 있으며, 특히 BRS에서 붕소 희석시 방출된 냉각재를 Evaporator를 통하여 회수 불능시 발생 예상되는 廢棄物은 부하추종운전에 큰 장애가 될 수 있다.

##### 2) BRS設備運轉

原子爐 過渡狀態 또는 正常運轉時 원자로 냉

각수계통의 체적제어를 목적으로 배출되는 爐冷却水를 회수하여 재사용할 수 있도록 처리하는 기능을 갖는데, 爐冷却水의 배출 및 회수경로를 보면, 화학 및 체적제어계통(CVCS)의 추출관을 거친 냉각수는 정화용 탈염기를 거친 다음 VCT 상단에 위치한 수위제어밸브(VCT 수위와 inter lock됨)에 의하여 자동적으로 봉산회수계통 쪽으로 우회된다. BRS로 유입된 과잉의 노냉각수는 혼상이온탈염기(H/OH형)를 거쳐 각종 放射性物質이 제거된후 회수탱크에 저장된다(발전소에 따라서는 탈염기와 회수탱크의 위치를 바꿔 설치하기도 한다). 회수탱크에 저장된 노냉각수는 이송펌프에 의해 증발기로 보내어져 이곳에서 봉산과 증류수로 분리된다. 증류수는 음이온탈염기(-OH형 강염기성 음이온수지)에서 휘발성 방사성 음이온을 제거한후 1次系統 補充수로 재사용되며 농축된 봉산(4% 또는 12%로 농축)은 봉산저장탱크로 회수되어 재사용된다.

3) 爐冷却水 回收탱크

회수탱크에 모여진 노냉각수는 증발기로 보내어져 증발 및 농축과정을 거친다. 만일 회수탱크의 水質이 좋지 못할 경우 농축봉산액의 純度 역시 재사용에 적합치 못해 廢棄物로 처리해야하므로 이로 인해 放射性廢棄物 發生量을 증가시키게 된다. 따라서 저장수의 수질은 항상 순도를 높게 유지해야 하며, 만족할 만한 수질조건이 되지 못할 경우는 정화용 혼상이온탈염기를 통하여 순환시켜 정화토록 한다.

4) 再循環 蒸發器 運轉

회수탱크에서 부터 증발기로 들어온 流入水(50~130°F)는 豫熱過程을 거쳐 약215°F정도로 가열된후 탈기관의 상부로 분사되면서 용존기체(특히 방사성 기체)는 용출하여 기체감쇠탱크(GDF)로 보내고, 유입수는 증발기 하부로 보내어져 증발·농축과정을 거친다. 이곳에서는 증류수와 농축봉산수로 분리되는데, 증발기 용량표시는 보통 유입수 유량을 말하며 증류수 유

량과도 별 차이가 없다. 증발기 운전중 Carry-over현상으로 증류수의 수질이 만족치 못할 수도 있는데, 증류수 출구관에 傳導度計가 설치되어 있어 증류수의 전도도가 설정치 이상일때 자동적으로 再循環 록 되어 있다. 증발기 운전상태가 양호하다 할지라도 일부 휘발성 물질을 제거하기 위해 증류수 냉각기 후단에 -OH형의 강염기성 음이온교환수지가 충전된 탈염기를 거치도록 하여 1次系統의 補充수로 재사용한다.

한편 농축봉산수의 경우 봉산의 豫定濃度에 도달하면 봉산의 농도 및 순도측정을 한 후 재사용 여부를 결정하는데 水質條件이 만족되면 이송펌프에 의해 봉산탱크(Boric Acid Tank)로 이송되며, 그렇지 못한 경우 혼상이온탈염기를 통해 재순환시키거나 폐기물 처리계통의 증발기로 보내어 농축후 固化處理한다. 봉산회수계통의 증발기는 폐기물 처리계통의 증발기가 여의치 못할 경우에 대비하여 대응할 수 있도록 설계되기도 하는데, 이때를 대비해 Foa-ming에 의한 Carryover 방지를 위한 Antifoaming Reagent 주입설비를 갖추고 있다.

나. 硼酸熱再生系統

1) 概要

용액상태의 봉산은 水溫에 따라서 電離方式 및 電離度가 달라지는데 이로 인한 이온교환수지의 교환용량의 차이를 이용하여 PWR 원자로의 反應度 制御에 사용되고 있는 봉산의 농도 변화에 활용함으로써 出力變動時 Xe의 過渡現象에 대한 보상과 잉여 유출수 생성량을 극소화하는데 기여할 수 있다.

2) 目的

가) 주로 加壓輕水爐型 原子爐에서 부하추중 운전시 Xe의 과도현상 및 출력결손에 따른 반응도 보상에 효과적으로 대응하고 잉여 노냉각 유출생성량을 극소화하기 위함이다.

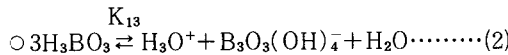
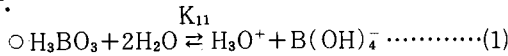
나) 爐心末期 봉산 제거를 위한 탈봉산염 이온교환기 기능을 수행하여 BRS의 LOAD 경감

을 하기 위함이다.

3) 運轉原理

가) 硼酸의 電離

대부분의 무기화학 물질이 용액상태에서 전리되어 ion으로 존재하듯이 붕산(H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>) 역시 물에 용해되면서 Monoborate ion[B(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>]과 Triborate ion[B<sub>3</sub>O<sub>3</sub>(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>]상태로 수중에 존재한다.



나) 電離常數와 溫度와의 關係

電離常數 K<sub>11</sub>과 K<sub>13</sub>은 流入 水溫에 따라 그림 1 과 같이 변한다(表 1 참조).

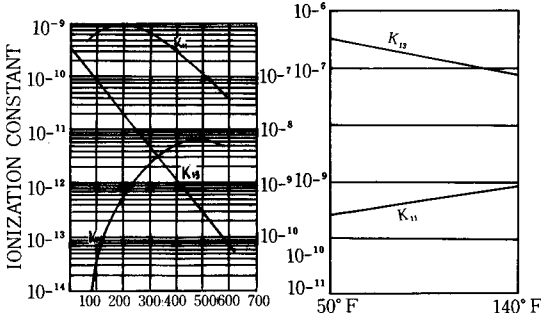
(1) BTRS 運轉溫度內에서 온도가 증가함에 따라(10°C → 60°C) i)K<sub>13</sub>감소, ii)K<sub>11</sub>증가, iii)K<sub>w</sub> 증가하므로 Monoborate ion이 증가하고 Triborate ion은 감소되어 붕소 치환율이 감소되면서 탈염기 유출수의 붕소농도는 증가함.

(2) BTRS 운전온도내에서 온도가 감소함에 따라(60°C → 10°C) i)K<sub>13</sub>증가, ii)K<sub>11</sub>감소, iii)K<sub>w</sub> 감소하므로 유입수중에 Triborate ion양이 증가하고 반대로 Monoborate ion양은 감소하므로 이온교환수지의 붕소 치환율이 증가하게 되어 탈

〈表 1〉 運轉溫度에 따른 硼酸의 電離常數比較

전 리 상 수	운 전 온 도	
	50°F	140°F
K <sub>11</sub>	5×10 <sup>-10</sup>	9×10 <sup>-10</sup>
K <sub>13</sub>	5×10 <sup>-7</sup>	9×10 <sup>-8</sup>

〈그림 1〉 水溫에 따른 K<sub>w</sub>, K<sub>11</sub>, K<sub>13</sub>의 電離常數



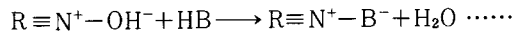
염기를 거친 물의 붕소농도는 떨어지게 된다.

(註: 運轉上限溫度를 140°F로 하는 이유는 음이온교환수지의 운전허용온도 때문이다.)

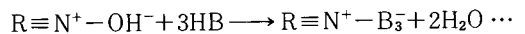
다) 이온交換樹脂의 特性

(1) Resin과 硼酸과의 反應式

이온교환수지는 목적에 따라 여러 종류가 제조되고 있으나, 이 系統에서 사용되는 수지는 Styrene-DVB계의 강염기성 음이온교환수지로서 “OH”형이 사용된다.



…(3) Resin의 한 치환기로 붕소 1원자 흡수



…(4) Resin의 한 치환기로 붕소 3원자 흡수

여기에서 B<sup>-</sup>는 B(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>, B<sub>3</sub><sup>-</sup>는 B<sub>3</sub>O<sub>3</sub>(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>를 의미함.

(2) BTRS에 채택하고 있는 수지로는(5&6 호기) Amberlite IRN 78L/C이며, 특징으로는

- Styrene-DVB계 강염기성 음이온교환수지로 -OH형
- 온도에 약하고(상한온도 140°F(60°C))장기 보관에 적합하지 못함.

4) BTRS設備運轉

가) 構成設備

(1) Moderating Hx : 주로 Boration을 위한 설비

○ Boration시; Letdown水 豫熱

Demi流出水 豫冷却

(2) Letdown Chiller Hx : 주로 Dilution을 위한 설비

○ Dilution시; Moderating Hx의 Tube Side 유출수를 10°C(50°F)로 냉각

○ Boration시; Moderating Hx의 Shell Side 유출수 냉각(RCP Seal계통 고온수 유입 방지)

(3) Letdown Reheat : Boration시만 사용

○ Demi유입수를 140°F(60°C)로 유지(이때 加熱源은 Letdown Hx 전단의 Letdown 水(300°F)를 이용)

(4) Chiller Water Loop

- (가) Chiller Unit : Letdown Chiller Hx에 4°F의 냉각수 공급
- (나) Chiller Surge Tank : Chiller Water Loop팽창, 수축 및 Leak대비
- (다) Chiller Pump : Chiller Water Loop순환

(5) Demineralizer

- (가) 수량 : 4 대
- (나) Vol. : 74ft<sup>3</sup>/대
- (다) 가역유로운전
  - Boration시 : Upflow-Dilution시 상층부에 잡힌 불소가 빨리 방출
  - Dilution시 : Downflow-불산 제거 효과가 좋음

나) 運轉方式

BTRS는 화학 및 체적제어계통(CVCS) 혼상 탈염탑(Mixed Bed) 후단과 체적제어탱크(Volume Control Tank) 전단 사이에 위치하며 유입수 온도를 50°F(10°C), 140°F(60°C)로 운전한다. 운전방식으로는 Bypass, Dilution, Boration의 세가지가 있는데 각기 流路는 다음과 같다.

- (1) BTRS Bypass
- (2) BTRS Dilution
- (3) BTRS Boration
- 5) 이온交換樹脂塔(Demineralizer)再生運轉
  - 가) 流出水(Letdown)를 이용한 탈염기 재생 운전

○目的

BTRS Demi의 불소 흡수능력을 증가시킬 목적으로 이 절차가 사용되며 원자로 보충수 제어계통의 불산회석운전과 병행한다.

○先行條件

- (1) 원자로 제어계통에 불산회석운전중일 것
- (2) VCT Level 30~50% 유지
- (3) BTRS Boration Mode

나) 原子爐 補充水 制御系統을 이용한 탈염

기 수지세척운전

○目的

원자로 냉각수에 대량의 불산회석이 요구될 때를 대비(부하추종운전, 원자로 기동, 노심말기 운전)하여 필요에 따라 1개 또는 2개 이상의 탈염기를 원자로 보충수 제어계통과 BTRS를 병행운전하여 재생하기 위한 절차.

○先行節次

- (1) RMWST(Reactor Makeup Water Storage Tank) Pump기동
- (2) Boration Mode(Boration Mode의 온도에서 Kw가 최대)
- (3) 필요한 탈염기 상하부 Valve Open
- (4) 탈염기 입구온도 조절은 순수 보충수 제어 Valve로 한다

3. 負荷追從에 따른 剩餘流出冷却水量 計算

가. 概要

미국 웨스팅하우스社에서 공급한 加壓輕水爐(PWR)는 대부분 부하추종운전을 할 수 있도록 설계되어 있으나, 出力增發 및 減發에 따른 과도현상과 출력결손을 적절히 제어하기 위해서는 爐心內에 상당한 불소량 변화가 요구되므로 부하추종운전시에는 다량의 剩餘流出水가 생성된다. 따라서 잉여유출수 처리를 위한 불산회수계통의 용량은 부하추종운전에 큰 영향을 주게 된다.

나. 일반적인 회석 및 불소 주입량 계산

$$V(\text{Dilution}) = V_{RCS} \times \ln(CB_1/CB_2)$$

$$V(\text{Boration}) = V_{RCS} \times \ln(7,000 - CB_1 / 7,000 - CB_2)$$

CB<sub>1</sub> = 회석수 주입전의 불소농도(ppm)

CB<sub>2</sub> = 회석수 주입후의 불소농도(ppm)

다. 불소주입 및 회석속도 제한

불소주입과 회석은 화학 및 체적제어계통(CVCS)과 원자로 보충수계통(RMWS)의 도움으로 이루어지며, 불소주입과 회석속도 제한은 주로 최대유출수(Letdown)유량에 다음과 같이 비례한다.

	3-Loop 900MWe급 PWR	4-Loop 1,300MWe급 PWR
회석	최대유량(Q, max)=27m <sup>3</sup> /hr, dC <sub>B</sub> = -C <sub>B</sub> × Q, max /V, Rcs 혹은 dC <sub>B</sub> = 0.1 C <sub>B</sub> ppm/hr	dC <sub>B</sub> = -0.102(C <sub>B</sub> - 10)ppm/hr
붕소주입	최대유량(Q, max)=9m <sup>3</sup> /hr, dC <sub>B</sub> =(7,000-C <sub>B</sub> )Q, max/V, Rcs 혹은 dC <sub>B</sub> =600ppm/hr	dC <sub>B</sub> =0.029(7,000 - C <sub>B</sub> )ppm/hr

라. 하루 평균 생성유출량(12-3-6-3, 100% -50%-100%)

1) 냉각재 붕소 1ppm 변화시키는데 필요한 붕소 주입 및 회석량(KNU 5&6)

운전 모드 냉각재 붕소농도	붕소회석량 (Dilution)	붕소주입량 (Boration)
10ppm(EOL)	18,744 ℓ	25.1 ℓ
40ppm	4,504 ℓ	25.2 ℓ
100ppm	1,788 ℓ	25.4 ℓ
250ppm	713 ℓ	26 ℓ
500ppm	358 ℓ	27 ℓ
1,000ppm (BOL)	178 ℓ	29 ℓ
2,000ppm	89 ℓ	35.1 ℓ

2) 연소도(Burn Up)에 따른 대표적인 流出量 曲線(그림 2 참조).

3) 원자력 6호기 燃焼度(Burn Up)에 따른 Dilution/Boration量

(온도 : 304.44℃  
기간 : 1.5일)

핵연료주기(%)	10(BOL)	50(MOL)	70(EOL)
연소도(MWD/MTU)	1,235	6,175	8,645
냉각수 C <sub>B</sub> (ppm)	730	480	300
반응도생성량(정반응도/부반응도)(ppm)	1,220/ 1,200	1,340/ 1,300	1,460/ 1,410
등가 붕소 농도변화량(정반응도/부반응도)(ppm)	117.52/ 115.59	128.39/ 124.55	137.16/ 132.47
붕소주입량/보충수 주입량 (톤)	3.29/ 28.9	3.46/ 48.28	3.61/ 84.5

- (가) 핵연료주기 10%일때 부하추종곡선(그림3)
- (나) 핵연료주기 50%일때 부하추종곡선(그림4)
- (다) 핵연료주기 70%일때 부하추종곡선(그림5)

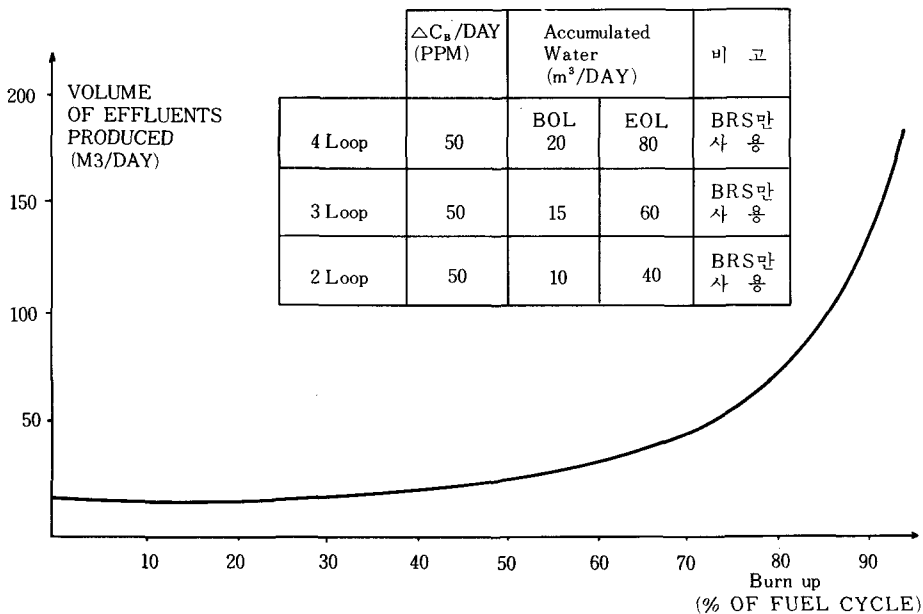
\* 산출근거

○ Boron Recycle Evaporator Operation  
Load Factor: 0.6

○ 원자력 5&6, 7호기 부하추종시험시 평균 붕소변화값 적용; ΔC<sub>B</sub>63ppm

• 分 析

(그림 2) 燃焼度에 따른 代表的인 流出量 曲線



(가) 12-3-6-3 부하추중운전시 50%까지 減發運轉을 가정할때 핵연료주기 70%를 넘어서면 회석방출량이 BRS Evaporator용량을 초과하게 되며 Exponential함수로 증가하므로 70% 이상에서는 BRS만을 이용한 부하추중운전을 하기는 어렵다.

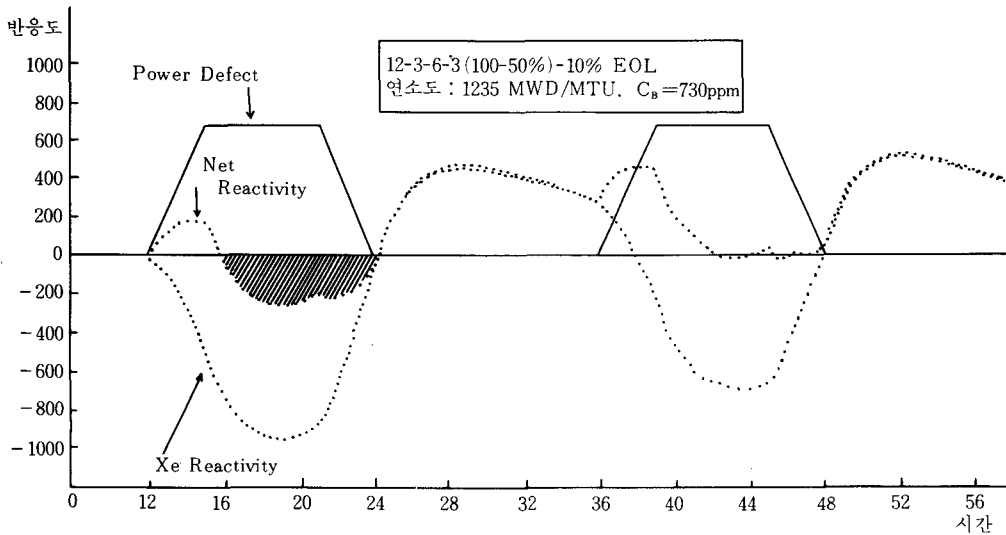
(나) 원자력 5&6호기를 동시에 부하추중운전시는 BRS가 감당할 수 있는 처리량은 냉각

수(RCS) 붕소농도( $C_B$ )가 각 호기당 약540ppm 정도까지는 처리 가능함.

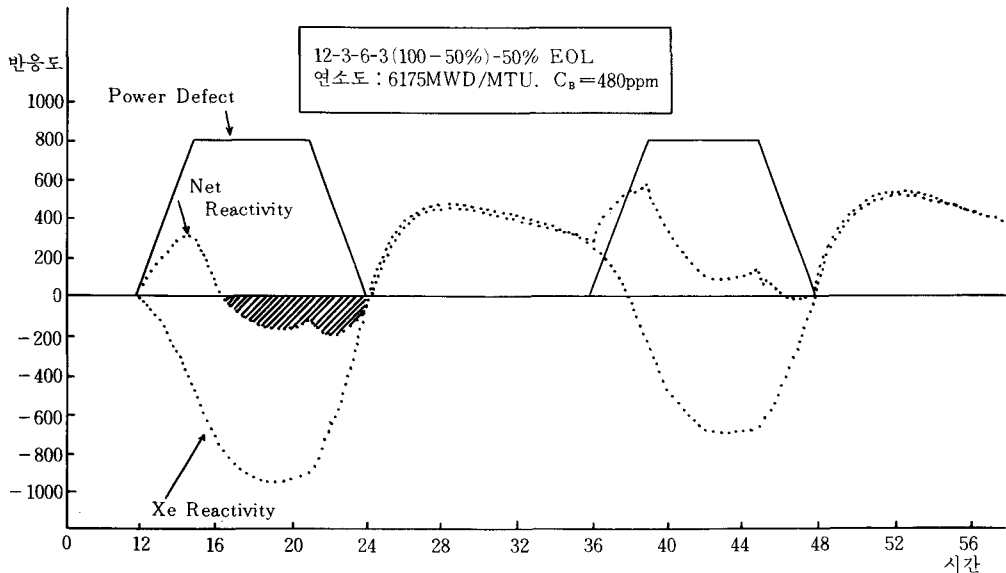
5) 붕소열재생계통(BTRS)을 이용한 냉각각 유출수 처리능력

• BTRS의 용량은 원자로 출력설계용량, 추출수 설계용량 및 노심의 연소도, 즉 냉각수중의 붕소농도에 따라 차이가 있으나 일반적으로 다음과 같은 設計容量을 갖는다.

<그림 3> 核燃料週期 10%일때 負荷追從曲線



<그림 4> 核燃料週期 50%일때 負荷追從曲線



가) 設計容量

	주기	BOL	EOL
붕소농도변화율			
Dilution Rate(ppm/hr)		20	10
Boration Rate(ppm/hr)		40	20

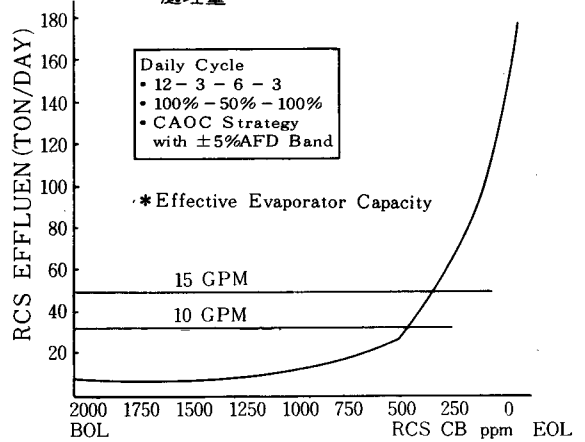
4) 붕소회수계통(BRS)을 이용한 유출수 처리능력(그림 6 참조).

용량 호기별	붕소재순환 증발기처리 량(TON/ DAY)	냉각유출수 저장탱크용 량(TON)	생성유출량 (Ton/DAY)			비 고
			BOL	MOL	EOL	
KNU1	49	412	18	18	40	BTRS 보 유
KNU 2	49	242	10	18	40	BTRS 보 유
KNU 5 &6	49	863	19× 2기	32× 2기	56× 2기	BTRS 보 유
KNU 7 &8	KNU 5 &6과 동일					

나) 원자력 7 호기 BTRS 성능시험값

○高温機能試驗(HFT)末期에 4 대의 탈염기 탐중 3대를 노냉각수 붕소농도범위(250ppm-50 ppm)에서 붕산열재생계통(BTRS)의 붕산 회석(Dilution)능력 및 붕산주입(Boration) 능력을 확인하고 각 운전모드에서 음이온 탈염기의 이온교환용량을 평가 및 자료화하여 出力運轉, 특히 부하추중운전시 노냉각 유출수 생성을 극소화하기 위한 수단으로의 기본지침을 마련하는

(그림 6) 爐冷却水 硼素濃度變化에 따른 蒸發器 處理量



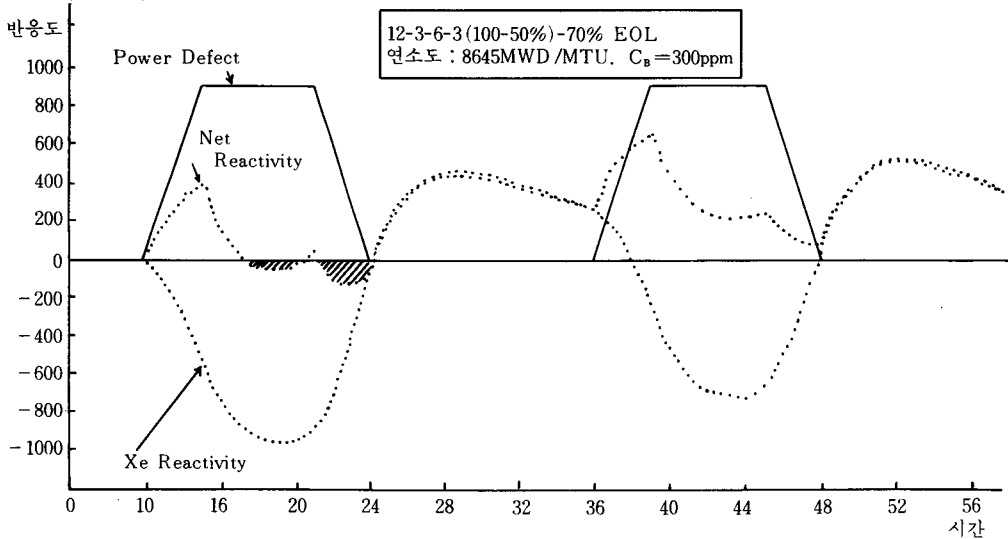
데 그 목적이 있다.

(1) 노냉각계통회석(RCS Dilution)

(KNU7, 시험 수행기간 85.10.9~10.19)

호기	냉각수 붕소농도 변화율 및 시간	C <sub>B</sub> : 253	C <sub>B</sub> : 207	C <sub>B</sub> : 233	C <sub>B</sub> : 57	C <sub>B</sub> : 36	평균 ppm
		ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
K N U 7	RCS Dilution Rate (ppm/hr)	9.4	-	4.5	2.2	1.2	4.3
	RCS 평형 도달시간(Hrs)	5	-	8.5	10.5	2.8	13
B Y R O N 1	RCS Dilution Rate (ppm/hr)	-	3.9	-	-	-	3.9
	RCS 평형 도달시간(Hrs)	-	14	-	-	-	14

(그림 5) 核燃料週期 70%일때 負荷追從曲線



(2) 노냉각계통봉산주입(RCR Boration)

(KNU 7, 시험수행기간 : 85. 10. 9~10. 19)

호기	냉각수붕소농도 변화율 및 시간	C <sub>B</sub> : 205 ppm	C <sub>B</sub> : 163 ppm
		호기	
KNU 7	RCS Boration Rate (ppm/hr)	5.7	-
	RCS 평형도달 시간(Hrs)	7	-
BYRON 1	RCS Boration Rate (ppm/hr)	-	12.7
	RCS 평형도달 시간(Hrs)	-	4.5

\*註 : KNU 7 은 각 탈염탑당 74ft<sup>3</sup>, Byron Unit 1 은 20ft<sup>3</sup> 충전했으며, KNU 7 은 한개의 탈염탑씩 운전한데 반하여 Byron Unit 1 은 4 개의 탈염탑을 동시에 운전했음. 탈염탑을 통과한 樹脂量은 KNU 7 이 70ft<sup>3</sup>, Byron Unit 1 은 80ft<sup>3</sup>임.

다) 봉산열재생계통 사용시 생성된 유출냉각수량

• 원자력 6, 7호기의 부하추중시험운전시 Xe 과도현상의 제어를 위해 봉산열재생계통(BTR-S)을 사용하였으며, 이의 사용으로 인해 희석수(Dilution Water)량이 감소하여 유출냉각수량이 약 절반 정도 감소하였음을 보여줌.

호기	ΔC <sub>B</sub> /Day (ppm)	일일유출수량(m <sup>3</sup> )	용량 (MWe)	비고
		BOL		
KNU-5	71	20	900	BRS만 사용
KNU-6	50	11.7	900	BRS/BTRS 병용
KNU-7	70	9.56	900	BRS/BTRS 병용

(1) 원자력 5호기 부하추중운전에 따른 희석 및 봉산화 생성량(表 2)

(2) 원자력 6호기 부하추중운전에 따른 희석 및 봉산화 생성량(表 3)

(3) 원자력 7호기 부하추중운전에 따른 희석 및 봉산화 생성량(表 4)

• 分 析

(1) 12-3-6-3(100%-50%%-100%) 부하 추중운전시 BTRS를 사용한다면 爐冷却水(RCS)의 붕소농도가 약130ppm(핵연료주기 87%)에도 도달 때까지 부하추중운전이 가능함(B. A. Evaporator 일일처리능력; 49톤/일로 가정).

(2) 원자력 5&6 호기를 동시에 부하추중운전시는 BRS/BTRS를 병행하여 사용한다면 노냉각수가 붕소농도가 약290ppm(핵연료주기 70%)에 도달할 때까지는 부하추중운전이 가능함(B. A. Evaporator 일일처리능력; 49톤/일로 가정).

<表 2> 原子力 5號機 負荷追從運轉에 따른 희석 및 봉산주입량

(시행일시 : 1985. 9. 22~9. 23)

일시	초기냉각수 붕소농도 (ppm)	최종냉각수 붕소농도 (ppm)	ΔC <sub>B</sub> (ppm)	희석시간 (hr)	봉산주입시간 (hr)	붕소농도 변화율 (ppm/hr)	보충수 희석량 (ton)	봉산주입량 (ton)	비고 12-3-6-3 100-50-100%
9/22									
02:05~04:19	721	727	6		2.23	2.7		0.32	02:05 출력감발(100%→50%)
04:19~10:35	727	682	45	6.27		7.2	13.3		04:39 출력 50%도달
10:35~19:50	682	753	71		9.25	7.7	2.7	2.02	10:52 출력증발 14:55 노출력100%도달
19:50~9/23									
02:04	753	734	19	6.23		3.1	4.5		01:34 출력감발
02:04~04:14	734	742	8		2.17	3.7		0.2	
04:14~11:26	742	690	52	7.2		7.6	14.7		05:06 노출력 50%도달
11:26~14:40	690	716	26		3.2	8.1		0.54	11:00 출력증발

\*참고사항 : 1 차계통 보른농도 : 716ppm, 연소도 : 2, 540MWD/MTU



# 技術論文

(3) 냉각수 붕소농도가 높은 BOL에서는 BT-RS 성능시험을 수행하지 않았기 때문에 Dilution/Boration에 대한 정확한 성능값을 알 수 없으나, 원자력 6, 7호기의 BOL에서 수행한 부하추종시의 붕소변화율로 보아 BTRS에서 절반이상의 Dilution/Boration양을 담당할 수 있으리라 봄.

## 4. 負荷追從運轉에 따른 問題點

### 가. 硼酸熱再生系統(BTRS)

#### 1) 正常運轉

가) 잦은 온도변화(40°C ↔ 5°C)시 배관 연결 부위 및 밸브 스템부위의 열변화로 인해 누설(Leak)이 자주 발생.

나) 정상운전시 Fuel Burn up에 따라 냉각수 붕소농도(RCS C<sub>B</sub>)가 일일 2~3ppm씩 줄어들므로 이의 보상을 위해 일정량의 희석이 요구

〈表 3〉 原子力 6 號機 負荷追從運轉에 따른 희석 및 붕산주입량

(시행일시 : 1985. 9. 22~9. 23)

일 시	초기냉각수 붕소 농도 (ppm)	최종냉각수 붕소 농도 (ppm)	$\Delta C_B$ (ppm)	희 석 시 간 (hr)	붕산주입 시 간 (hr)	붕소농도 변화율 (ppm/hr)	보충수 희석량 (ton)	붕 산 주입량 (ton)	비 고 12-3-6-3 100-50-100%
4 / 4 12 : 03~12 : 20	768	781	13		0.28	46		0.45	12 : 03 출력감발 (100→50%)
12 : 20~18 : 20	781	723	58	6		9.7	13.4		15 : 00 출력50%도달 15 : 17 BTRS "D" Mode작동 16 : 42 BTRS v/v 43% 18 : 20 BTRS v/v 20% 21 : 42 출력증발 22 : 29 BTRS "B" Mode v/v 90%
18 : 20~00 : 20	723	773	50		5.86	8.5		1.35	23 : 00 BTRS v/v 65% 23 : 16 "B" v/v 100% 23 : 20 "B" v/v 75% 00 : 20 "B" v/v 60% 00 : 32 BTRS "D" Mode 00 : 49 출력 100%도달
4 / 5 00 : 20~00 : 54	773	773	0	0.43		-	1.25		00 : 54 출력감발(92%) 00 : 55 BTRS v/v 100%
00 : 54~01 : 06	773	773	0		0.22			0.4	07 : 06 BTRS "D" Mode 07 : 48 "D" v/v 65% 10 : 45 "D" v/v 55%
01 : 06~12 : 20	773	807	34	2.13	1.11	21	3.85	0.69	12 : 00 출력 감발 14 : 10 BTRS "B" v/v 35%
12 : 20~15 : 23	796	794	2	1.17	1.83		1.3	0.1	15 : 00 출력50%도달 15 : 23 "B" v/v 35%
15 : 23~21 : 00	792	762	30	1.55	4.52	9.9	2.5	0.3	16 : 24 BTRS "D" 70% 19 : 20 BTRS "D" 70% 21 : 42 BTRS "B" Mode 21 : 47 "B" v/v 60% 22 : 30 "B" v/v 20% 22 : 48 "B" v/v 40%
21 : 00~00 : 01	753	768	15	1.48	1.5	10	2.6	0.66	23 : 09 BTRS "off"
4 / 6 00 : 01~02 : 49	768	802	34		2.8	12.1		0.71	00 : 01 출력100%도달 02 : 07 BTRS "B" Mode
02 : 49~10 : 52	802	804	2	8		0.3	5.3		03 : 38 BTRS "off" 04 : 50 BTRS "D" Mode

되어 RCS Leak rate(정상 0.1~0.2GPM)보상을 위해 보충수를 공급받아야 되므로 BTRS를 사용하지 않게 됨.

2) 負荷追從運轉

가) 붕소농도변화에 따른 각 탈염기탑의 정확한 성능시험이 선행되어야 함.

나) 신속한 反應度 制御가 요구되나 다음과 같은 이유 때문에 반응응답시간(Response time)이 지연됨.

첫째; 변화된 붕소농도가 爐心에 도달할 때까지 걸리는 시간(Piping-Induced Delay Time).

둘째; 爐冷却系統과 화학 및 체적제어계통의 체적제어탱크(VCT)에서 냉각수의 균질, 혼합을 하는데 걸리는 시간(Volume Induced Time Constants).

셋째; 爐冷却系統에서 화학 및 체적제어계통으로 유출된 냉각수는 Boration/Dilution을 위해 전량 BTRS를 통과하기 때문에 3개의 탈염탑에 들어있던 물이 교체될 때까지 걸리는 시간.

다) BTRS탈염기탑 잔유수로 인해 Boration/Dilution시 순간적인 역반응도효과를 초래할

수 있음.

라) 탈염기탑의 운전에 따른 수시 붕소저장용량이 파악되지 못했을 경우 만족할만한 Boration/Dilution효과를 얻기 어려움.

마) 爐心末期(EOL)에 Dilution효과를 높이기 위해 탈염탑 재생시 잉여처리수 추가 발생.

나. 號機別 問題點

1) 原子力 1號機

硼酸熱再生系統(BTRS)設備를 보유하고 있지 않기 때문에 붕산재순환증발기(Boron Recycle Evaporator)에 의존해야 되며, 증발기의 제염 성능에 따라 유출수의 처리량은 크게 달라지게 된다. 원자력 1호기는 2대의 증발기를 보유하고 있기 때문에 연속운전이 가능하며 15GPM용량으로 처리시 핵연료주기 70%까지는 부하추중운전이 가능하다. 그러나 증발기에서 분리 회수된 방사능을 띤 증류수를 전량 회수하여 계통으로 재사용할 경우 노냉각계통외에 他系統으로도 공급되도록 설계되어 있어 全系統의 방사능 오염이 우려됨.

2) 原子力 2號機

붕산열재생계통(BTRS)과 15GPM 증발기를

〈表 4〉 原子力 7號機 負荷追從運轉에 따른 희석 및 붕산주입량

(시행일시: 1985. 9. 22~9. 23)

일 시	초기냉각수 붕소농도 (ppm)	최종냉각수 붕소농도 (ppm)	$\Delta C_B$ (ppm)	희 석 시간 (hr)	붕산주입 시간 (hr)	붕소농도 변화율 (ppm/hr)	보충수 희석량 (ton)	붕 산 주입량 (ton)	비 고 12-3-6-3 100-50-100%
8 / 9 21 : 00~22 : 13	867	875	7		1.2	5.8		0.15	21 : 00 출력감발 (100→50%)
8 / 10 22 : 13~03 : 57	872	823	49	5.7		8.6	11.8		00 : 13 출력50%도달
03 : 57~12 : 28	823	896	73		8.5	8.6	0.6	2.56	06 : 00 출력증발 09 : 00 출력100%도달
12 : 28~23 : 40	896	860	36	11.2		3.2	6.5		21 : 00 출력감발 23 : 23 BTRS "D" Mode 작동
8 / 11 23 : 40~02 : 40	866	831	31	3		10.3	-	-	00 : 00 출력50%도달 09 : 50 BTRS off
03 : 13~09 : 00	821	865	44		5.47	8.0	1.38	1.67	06 : 00 출력증발 06 : 30 BTRS 작동
09 : 00~12 : 00	865	891	26		3	8.7	2.42	1.25	09 : 00 출력 100%도달
12 : 00~19 : 00	891						3.89		



원하는 시간대의 부하추종운전에 제약을 줄 수 있는 많은 변수가 내재하고 있다.

앞에서 지적한 부하추종운전시 문제점 및 B-TRS사용시 문제점 등이 사전에 충분히 검토, 보완되어진다면 핵연료주기 약70%까지의 부하추종에 따른 잉여유출수 처리는 큰 문제가 되지 않으리라 본다.

### 3) 原子力5&6號機

2기를 동시 부하추종운전시 봉산열재생계통(BTRS)과 15GPM처리용량을 가진 봉산재순환증발기를 병용하여 사용한다면 핵연료주기 70%(봉소농도: 290ppm)까지는 담당할 수 있으나 설비운전시 몇가지 문제요인을 안고 있다.

첫째: 5&6 호기의 기체감쇠탱크(Gas Decay Tank)는 원자력1, 2호기와 설비가 다른 활성탄 지연탑(Charcoal Delay Bed)을 사용하기 때문에 증발기에서 기체 분리탑을 통해 분리추출된 방사성 기체의 제거가 용이하지 않으며,

둘째: 봉산재순환증발기에서 분리된 증류수(Distillate Water)는 중간저장탱크가 없어 수질이 나쁠 경우 정화하여 재사용할 수 없기 때문에 방사성폐기물 발생량 증가요인이 됨.

## III. 結 論

加壓輕水爐型(PWR) 원자력발전소의 부하추종운전시 생성되는 유출냉각수 처리능력은 각 발전소가 보유하고 있는 BRS Evaporator에 의

해 핵연료주기 70%까지는 감당할 수 있으나, 그 이상이 되면 Exponential함수로 증가하기 때문에 처리할 수 없게 된다. 원자력 1호기를 제외한 다른 발전소에서는 硼酸熱再生系統(BTRS)設備를 보유하고 있으며 원자력 6, 7호기 爐心初期(BOL)에서 자체 시험한 희석율/봉산화율(설계용량: 희석율 20ppm/hr at BOL, 봉산화율: 40ppm/hr at BOL)은 설계용량의 약 절반 정도의 효과밖에 얻지 못하였으나 BTRS탈염기탑을 각 봉소농도에 따라 정확한 성능시험을 수행함으로써 樹脂의 Dilution/Boration 능력 입증 및 운전방법 개선 등을 도모하여 효율적으로 운용하게 된다면 희석유출수의 양을 절반 이상 줄일 수 있으며 핵연료주기 약 70%까지도 BTRS에서 감당할 수 있으리라 본다.

봉산재순환증발기의 日運轉處理容量을 증발기 설계용량인 15GPM(Load factor: 0.6)으로 계산하였으나, 증발기의 장기간 운전으로 인한 성능저하, 불시고장 및 보수시 예비증발기가 없으며 수지교체 등으로 인한 운전지연 등 동시에 운전시는 핵연료주기 87%(봉소농도: 130ppm)까지 부하추종운전이 가능하나 아직까지 BTRS설비에 대한 성능시험이 입증되지 않은 상태이며 운전경험이 많지않아 사용시 많은 주의를 요하며 BTRS탈염기탑의 정확한 성능시험이 요구되어 진다.