

(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 특허공보(B1)

(51) Int. Cl.<sup>5</sup>  
G21C 7/36

(45) 공고일자 1990년07월08일  
(11) 공고번호 특허1990-0004869

(21) 출원번호	특 1984-0001599	(65) 공개번호	특 1984-0008504
(22) 출원일자	1984년03월28일	(43) 공개일자	1984년12월15일
(30) 우선권주장	83-59301 1983년04월06일 일본(JP)		
(71) 출원인	가부시기가이샤 히다찌세이사꾸쇼 미다 가쓰시게		
(72) 발명자	일본국 도오교오도 지요다구 간다스루가다이 4조메 6반지 오오하시 마사히사		
	일본국 아바라기켄 히다찌시 스께가와쵸 4조메 10-2 마스다 히로유키		
(74) 대리인	일본국 이바라기켄 히다찌시 니시나루사와쵸 4-39-17 김서일		

심사관 : 정용식 (책  
자공보 제1936호)

(54) 원자로의 운전제어방법

요약

내용 없음.

대표도

도1

명세서

[발명의 명칭]

원자로의 운전제어방법

[도면의 간단한 설명]

제1도는 부하추종운전을 실시했을 때의 압력관형 원자로에 있어서의 제특성의 변화를 나타낸 설명도.

제2도는 압력관형 원자로에 적용한 본원 발명의 적합한 일실시예인 부하추종 제어장치의 계통도.

제3도는 제2도에 II-II 단면도.

제4도는 제2도에 나타난 부하추종 제어장치의 상세 계통도.

제5도는 부하변경계획의 설명도.

제6도는 제4도에 나타난 제어봉 제어장치의 기능을 나타낸 구조도.

제7도는 제4도에 나타난 액체포이즌 제거·주입속도 수정장치의 기능을 나타낸 플로차트.

제8도는 제4도에 나타난 제어봉위치 수정장치의 기능을 나타낸 플로차트.

제9도는 제4도에 나타난 액체포이즌 제거·주입속도 결정장치의 기능을 나타낸 플로차트.

제10도는 크세논 및 사마륨동적특성을 나타낸 설명도.

제11도는 노심반응도변화를 나타낸 특성도.

제12도는 필요제어반응도 변화를 나타낸 특성도.

제13도는 제어시간구분의 결정을 나타낸 설명도.

제14도는 중수(重水)중의 액체포이즌 농도와 반응도와의 관계를 나타낸 특성도.

제15도는 액체포이즌 제거·주입기준속도의 특성도.

제16도는 제2도에 나타난 투입반응도 계산장치(31)의 기능을 나타낸 플로차트.

제17도는 제어봉위치와 투입반응도와의 관계를 나타낸 특성도.

제18도는 액체포이즌 제거·주입조작시간과 투입반응도와의 관계를 나타낸 특성도.

제19도는 제2도에 나타난 액체포이즌 제거·주입속도 지시장치의 기능을 나타낸 플로차트.

제20도는 가압수형 원자로에 적용한 본원 발명의 다른 실시예의 계통도.

#### [발명의 상세한 설명]

본원 발명은 원자로의 운전제어방법에 관한 것이며, 특히 제어봉 및 액체포이즌(poison)을 사용하여 출력제어를 행하는 원자로의 일부하(日負荷) 추종운전에 적용할 수 있는 원자로의 운전제어 방법에 관한 것이다.

압력관형(壓力管型) 원자로는 연료집합체를 내장하는 다수의 압력관을 감속재가 충전된 가열유체탱크에 그것을 관통하여 설치한 것이다. 압력관내는 냉각재가 유동한다. 이와 같은 압력관형 원자로의 출력제어는 가열유체탱크내에서 압력관 사이에 삽입되는 제어봉의 출입조작과, 가열유체탱크내의 감속재중에 혼입되는 액체포이즌 농도의 조절에 의해 행해진다.

최근, 원자로의 운전방법으로서의 베이스로드용으로서의 고정된 출력운전뿐만 아니라 부하의 변동에 따라서 출력을 변화시키는 부하추종운전의 적용이 검토되기 시작하고 있다. 상술한 압력관형 원자로도 예외는 아니며, 부하추종운전을 적용하는 것이 검토되고 있다. 그 구체예로서 일본국 특개소 57-141594호 공보에 나타난 것이 이미 제안되어 있다.

상기 공개공보의 제5도에 나타난 압력관형 원자로의 부하추종 운전제어장치는 하루의 주간과 야간의 전력 수요에 대응시켜, 매일 주간의 원자로 출력을 높게 하고, 야간의 원자로 출력을 낮게 제어하는 것이다. 압력관형 원자로와 같이 제어수단으로서 제어봉 및 액체포이즌 농도조절을 사용하는 원자로(압력관형 원자로 이외에 가압수형(加壓水型) 원자로가 있음)에서는 원자로 출력의 하강(또는 상승은 소정의 하강률 또는 상승률)에서 설정된 출력하강선(또는 출력상승선)을 중심으로 상하에 허용폭을 갖게 하여 이루어진 허용출력 하한선과의 범위내에서 행해진다.

압력관형 원자로의 부하추종운전제어에 대해 다음에 설명한다.

가열유체탱크내의 액체포이즌의 농도를 증가시킴으로써 주간의 높은 원자로 출력에서 야간의 낮은 원자로 출력으로 낮춘다. 제어봉의 삽입, 인발 등의 조작은 급격한 출력변동에 의해 연료집합체에 주는 손상이 크므로, 원자로 출력이 허용출력의 상한 또는 하한선을 일탈하는 경우에만 실시된다. 제어봉 조작은 액체포이즌 농도의 조절에 비해 원자로 출력의 변동비율이 매우 크며, 원자로 출력의 고출력 영역에서의 그 조작은 연료집합체에 손상을 줄 위험성이 있다. 이 때문에, 고출력 영역에서의 제어봉의 조작은 되도록 억제하는 것이 바람직하다.

상술한 공개공보의 제5도에 나타난 압력관형 원자로의 부하추종 운전제어는 부하추종운전시의 제어봉 조작의 회수를 저감시키려고 하는 것이다. 이 부하추종운전제어는 원자로 출력의 설정치 및 원자로의 동적(動的) 특성 해석용 데이터를 사용하여 원자로출력 변화에서 반응도의 시간변화의 예측치를 구하고, 예측치에서 구한 반응도 변화율의 크기에 따라서 출력제어의 시간을 구분하고, 각 구분시간내에 있어서의 액체포이즌의 주입량 또는 제거량의 최적치를 구하고, 가열유체탱크내의 액체포이즌 농도를 최적치로 조정하는 것이다. 그러나, 이 방법에 있어서도 제어봉의 조작회수는 감소 되었다고는 하나 원자로 출력을 50%로 하는 부하추종운전을 실시했을 경우, 원자로 출력을 50%로 유지하는 전후의 제어봉의 조작회수는 약 300회에 이른다.

본원 발명의 목적은 반복하여 실시되는 부하추종운전제어를 단순화 할 수 있는 원자로의 운전제어방법을 제공하는데 있다.

본원 발명의 다른 목적은 원자로 출력의 조조정용(祖調整用) 제어수단의 조작회수를 저감할 수 있는 원자로의 운전제어방법을 제공하는 데 있다.

본원 발명에 의하면, 원자로 출력의 조조정용으로서 제어봉으로 구성되는 제1제어수단과, 원자로 출력의 미조정용으로서 액체포이즌농도 조절수단으로 구성되는 제2제어수단을 갖는 원자로의 출력을 종전의 부하변경계획과는 상이하며, 소정 기간내의 부하변경이 주기적으로 반복되는 일정한 부하변경계획에 의거하여 예측되는 반응도에 따라서 제어하는 원자로의 운전제어방법에 있어서, 상기 부하변경계획의 제1 사이클에 있어서 상기 제1 제어수단의 조작에 의해 투입된 제1 반응도를 구하고, 상기 제1 사이클에 있어서의 상기 제2 제어수단의 조작에 의해 투입된 제2 반응도를 구하고, 상기 제1 사이클에 연속하는 부하변경계획의 제2 사이클에 있어서 상기 제2 제어수단의 조작에 의해 설정될 제3 반응도를 제1 및 제2 반응도에 따라서 예측하며, 상기 제3 반응도를 상기 제1 사이클기간에 예측하여 값을 기억하고, 상기 제2 사이클동안 상기 제1 사이클기간에 기억된 제3 반응도에 따라서 상기 제2 사이클에 있어서의 상기 제2 제어수단을 작동시킴으로써 원자로 출력을 제어하는 것을 특징으로 하는 원자로의 운전제어 방법을 제공한다.

이와 같은 본원 발명의 특징에 의하면, 종전의 사이클기간의 반응도에 의거하여 다음 사이클기간의 제2 제어수단의 조작을 행하여 원자로 출력을 제어하고 있으므로, 부하추종운전의 제어가 단순화되고, 매우 용이해진다.

압력관형 원자로에 부하추종운전을 적용했을 경우, 부하변경계획이 매일 같은 패턴 즉 부하변동사이클로 반복되면, 2일째 이후의 노심(爐心) 반응도 변화의 패턴이 실질적으로 동일해진다고 하는 것을 알았다. 그 현상을 다음에 설명한다. 제1도는 매일 부하를 변경하는 부하추종운전을 행했을 경우의 압력관형 원자로의 노심반응도 변화를 나타내고 있다. 이 경우에 있어서의 부하추종운전의 부하변경계획(37A)은 100%의 전기출력을 특성1(실선)으로 나타낸 것처럼 1시간 50%까지 낮추어, 50% 전기출력을 8시간 유지하고, 그 시간 경과 후에 1시간에 전기출력을 50%에서 100%까지 상승시켜, 전기출력 100%를 14시간 유지한다고 하는 패턴(부하변동사이클)을 매일 반복하는 것이다. 이와 같은 부하변경계획(37A)에 의거한 부하추종운전이 실시되기까지는 압력관형 원자로의 전기출력 100%를 얻도록 운전되고 있었던 것으로 한다. 특성 1과 같이 전기출력이 변화하면 그것에 수반해서 원자로의 열출력은 특성2(파선)과 같이 (55%로부터

100%), 또 노심내에서 핵분열에 의해 발생하는 크세논의 농도는 특성3(1점쇄선)과 같이 변화한다. 특성1과 같이 전기출력을 변경할 경우, 노심반응도는 특성3의 크세논 농도의 변화 및 출력계수의 영향을 받아 특성4(2점쇄선)와 같이 변화한다. 특성4의 노심반응도는 원자로의 운전형태를 바꾼 1일째는 별도로 하고, 2일째 이후에서 실질적으로 같은 변화로 되어 있다.

이와 같은 경향은 고전기출력 100%, 저전기출력 50%의 부하추종운전패턴에서 고전기출력 100%, 저전기출력 70%의 상이한 부하추종운전패턴으로 바꾸었을 경우도 같다. 즉, 후자의 패턴을 반복하여 부하추종운전을 실시함으로써, 패턴변화 후 2일째 이후의 노심반응도의 변화는 실질적으로 같다.

본원 발명은 같은 패턴의 부하추종운전을 반복하여 실시할 경우, 그 패턴을 몇번인가 반복한 다음에는 노심반응도의 변화가 실질적으로 같다고 하는 현상을 이용한 것이다.

본원 발명의 적합한 일 실시예인 원자로의 부하추종운전제어방법을 제2도에 의거하여 설명한다. 제2도는 압력관형 원자로에 적용한 부하추종제어장치를 나타내고 있다. 압력관형 원자로는 내부에 감속재인 중수가 충전되어 있는 가열유체탱크(1) 및 가열유체탱크(1)에 관통시켜 부착하여 연료집합체(3)를 내장하는 압력관(2)을 가지고 있다. 압력관(2)의 가열유체탱크(1)의 수평단면에 있어서의 배치는 제3도에 나타난다. 냉각재인 경수(輕水)(단지 냉각수라고 함)는 압력관(2)의 하부에서 압력관(2)내에 공급되며, 연료집합체(3)에 의해 가열되어 증기로 된다. 증기를 포함하고 있는 냉각수는 압력관(2)의 상부에서 증기드럼(도시생략)내에 공급된다. 여기서, 증기는 분리되어 터빈(도시생략)에 보낸다. 냉각수는 증기 드럼에 공급되는 급수와 함께 압력관(2)하부에 다시 인도된다. 냉각재로서 중수를 사용하는 압력관형 원자로도 있다. 이 경우, 압력관(2)에서 토출된 중수는 증기발생기에서 경수와 열교환되어 다시 압력관(2)내로 귀환한다. 경수는 증기발생기에서 증기로 되어 터빈으로 귀환한다. 가열유체탱크(1)내의 감속재인 중수는 순환펌프(4)의 구동에 의해 중수 순환배관(5) 및 가열유체탱크(1)내를 순환한다.

압력관형 원자로의 원자로출력은 가열유체탱크(1)의 압력관(2)의 사이, 즉 연료집합체(3) 사이에 출입되는 출력조정용의 제어봉(스테인레스봉)(6)의 조작 및 가열유체탱크(1)내에 충전되어 있는 중수중에 포함되는 액체포이즌 농도의 조절에 의해 제어된다. 제1 제어수단을 구성하는 제어봉(6)은 제어봉 구동장치(7)에 연결되며, 제어봉 구동장치(7)에 의해 다수의 연료집합체(3)로 구성되는 노심에 삽입되거나 또는 그것에서 인발된다. 출력조정용의 제어봉(6) 이외에 원자로의 운전을 정지시키는 운전정지용의 제어봉(도시생략)이 다수 설치되어 있다. 운전정지용의 제어봉은 원자로의 통상 운전시에 노심에서 인발되어 있으며, 정지시에 노심에 삽입된다. 액체포이즌 농도의 조절은 제2 제어수단을 구성하는 액체포이즌 주입장치(9) 및 액체포이즌 제거장치(16)로 구성되는 액체포이즌 농도조절수단의 조작으로 행해진다. 액체포이즌 주입장치(9) 및 액체포이즌 제거장치(16)는 중수순환배관(5)에 부착된다. 액체포이즌 주입장치(9)는 중수순환배관(5)에 접속되는 배관(10), 배관(10)에 접속되어 내부에 액체포이즌이 충전된 액체포이즌 탱크(11), 배관(10)에 부착되는 스톱밸브(12) 및 유량조절밸브(13)로 구성된다. 액체포이즌 농도계(14) 및 유량계(15)가 배관(10)에 배설된다. 액체포이즌 제거장치(16)는 양단이 중수순환배관(5)에 접속되는 배관(17), 배관(17)에 부착되어 내부에 이온교환수지가 충전된 액체포이즌 제거탑(18), 배관(17)에 설치된 스톱밸브(19) 및 (20)으로 이루어져 있다. 유량계(21)가 배관(17)에 배설된다. 유량조절밸브(22)는 중수순환배관(5)에 배치되어, 액체포이즌 제거장치(16)가 기능하고 있지 않을 때, 즉 스톱밸브(19) 및 (20)이 닫혀 있을 때에는 전개(全開)의 상태에 있다. 액체포이즌 제거장치(16)가 기능하고 있을 때, 즉 스톱밸브(19) 및 (20)이 열려 있을 때, 유량조절밸브(22)의 개폐도가 감소되어 중수순환배관(5)에서 액체포이즌 제거탑(18)에 공급되는 중수 유량이 제어된다.

제어봉(6), 액체포이즌 주입장치(9) 및 액체포이즌 제거장치(16)의 조작은 가열유체탱크(1)내에서 압력관(2) 사이에 중성자 검출기(23)의 출력에 의거하여 제어된다.

이와 같은 압력관형 원자로의 부하추종제어장치는 부하추종제어장치(24), 액체포이즌 제거제어장치(29A), 액체포이즌 주입제어장치(29B), 일정부하추종제어장치(30), 원자로 출력통괄제어장치(33) 및 조작반(34)으로 이루어져 있다. 조작반(34)을 제외한 다른 제어장치는 전자계산기로 구성된다. 원자로 출력통괄제어장치(33)는 부하추종제어장치(24) 및 일정부하추종제어장치(30)를 통괄하고 있다.

비교적 장시간의 커다란 반응도의 제어에는 중수중의 액체포이즌 농도의 조절의 적합하며, 단시간에서의 반응도의 조정에는 제어봉(6)의 조작이 적합하다. 그러나, 원자로 출력이 높은 영역에 있어서의 제어봉(6)의 조작은 연료파손의 위험성을 저감시키는 관점에서 되도록 피하는 것이 바람직하다. 제2 제어수단을 구성하는 액체포이즌 농도조절수단은 지효성(遲效性) 제어수단인 동시에 원자로 출력 미조정용 제어수단이다. 제1 제어수단을 구성하는 제어봉(6)은 즉효성(即效性) 제어수단인 동시에 액체포이즌 농도조절수단에 비해 원자로 출력을 크게 변동시키므로 원자로 출력 조조정용 제어수단이라고 할 수 있다. 본 실시예는 부하추종운전을 되도록 액체포이즌 농도의 조절을 실시함으로써 달성하고자 하는 것이다.

부하추종제어장치(24)는 제4도에 나타난 것처럼 제어봉 제어장치(25), 액체포이즌 제거·주입속도조정장치(26), 액체포이즌 제거·주입속도결정장치(27) 및 제어봉위치수정장치(28)로 이루어져 있다. 일정부하추종제어장치(30)는 제2도에 나타난 것처럼 투입반응도 계산장치(31) 및 액체포이즌 제거·주입속도지시장치(32)를 가지고 있다.

상기 제어장치를 사용하여 제1도의 특성(전기출력)에서 나타난 부하변경계획(37A)을 실시하는 본 실시예의 부하추종운전제어방법을 다음에 상세히 설명한다. 제5도에 나타난 부하변경계획(37B)은 제1도의 특성1에 나타난 전기출력에 의한 부하변경계획(37A)을 원자로 열출력의 변화로 나타난 것이다. 즉, 부하변경계획(37A)과 부하변경계획(37B)은 동일한 것이다. 부하변경계획(37B)은 원자로 열출력(이하 단지 원자로 출력이라고 함)을 100%로부터 1시간에 55%까지 낮추고, 55%원자로 출력을 8시간 유지하며, 그후 1시간에 원자로 출력을 55%로부터 100%까지 상승시키고, 100%로 14시간 유지하는 것이다. 이 운전패턴은 조작반(34)에서 해제의 지령이 나오기까지 매일 반복된다. 원자로 출력이 55%일 때에 전기출력이 50%까지 내려가는 것은 원자로 출력이 낮아지면 터빈효율이 저아되기 때문이다. 제5도의 파선(38) 및 (39)는 부하변경계획(37B)의 상한치 및 하한치를 나타내고 있다. 압력관형 원자로의 출력제어할 때, 크세논의

농도변화의 영향을 받기 쉽고, 원자로 출력이 변동되기 쉽다. 이 변동을 억제하여 원자로의 출력제어를 용이하게 하기 위해 상한치(38) 및 하한치(39)가 설치되어 있다. 부하변경계획(37B)과 상한치(38) 및 하한치(39)와의 각 출력차  $\Delta P$ 는 출력허용폭을 나타내고 있다.

부하변경계획(37A)은 조작반(34)에서 원자로 출력통괄제어장치(33)에 입력되며, 그 메모리(도시생략)내에 기억된다. 출력허용폭  $\Delta P$ 은 미리 원자로 출력통괄제어장치(33)의 메모리내에 기억되어 있다. 원자로 출력통괄제어장치(33)는 원자로의 운전계획을 비교하여, 지금까지 실시하고 있던 원자로의 운전계획과 상이한 운전계획이 입력되면, 개폐기(35)를 닫는다. 원자로 출력통괄제어장치(33)는 부하변경계획(37A)에 의거하여 시간  $t$ 에 대응하는 전기출력  $P_e(t)$ 을 원자로 출력  $P_n(t)$ 으로 변환되고, 이 원자로 출력  $P_n(t)$ 을 개폐기(35)를 통해 순차 부하추종제어장치(24)에 전달한다. 즉, 원자로 출력통괄제어장치(33)는 부하변경계획(37A)(제1도)을 부하변경계획(37B)(제5도)으로 변환하여 출력한다. 시간  $t$ 은 원자로 출력통괄제어장치(33)에 내장되는 타이머기능에 의해 계측된다. 출력허용폭  $\Delta P$  및 시간  $t$ 도 원자로 출력통괄제어장치(33)에서 부하추종제어장치(24)에 전달된다.

이들 신호를 입력하는 부하추종제어장치(24)의 기능을 설명한다.

부하추종제어장치(24)의 제어봉제어장치(25)의 동작을 제6도에 의거하여 설명한다. 중성자검출기(23)의 출력신호  $\phi_i(t)$ 가 제어봉제어장치(25)에 입력된다. 제어봉제어장치(25)의 블록(25A)은 노심의 제어영역  $i$ 마다의 출력신호  $\phi_i(t)$ 에 의거하여 제어영역  $i$ 의 원자로 출력  $P_{hi}(t)$ 을 구한다. 블록(25A)의 출력인  $P_{hi}(t)$ 는 블록(25B)에 입력된다. 여기서 모든 제어영역  $i$ 의 원자로 출력  $P_{hi}(t)$ 을 합계함으로써 원자로 출력  $P_{ht}(t)$ 이 구해진다. 원자로 출력  $P_{ht}(t)$ 은 블록(25C)에 입력되며, (1)식의 조건이 만족되는지 여부가 비교된다.

$$P_h(t) - \Delta P < P_m(t) < P_h(t) + \Delta P \quad \text{.....(1)}$$

(1)식의 조건이 만족될 경우, 제어봉 구동장치(7)는 동작하지 않으며, 제어봉(6)은 움직이지 않는다. (1)식의 조건이 만족되지 않을 때, 즉  $P_{ht}(t)$ 가  $(P_h(t) - \Delta P)$ 보다도 작을 경우는 제어봉 인발신호가, 또  $P_{ht}(t)$ 가  $(P_h(t) + \Delta P)$ 보다도 클 경우는 제어봉 삽입신호가 블록(25C)에서 출력된다. 이들 제어봉 조작신호가 출력되고, 블록(25D)에서 조작해야 할 제어봉 구동장치(7)가 선택된다. 선택된 제어봉 구동장치(7)에 블록(25D)의 출력신호가 입력되면, 그것에 연결된 제어봉(6)이 (1)식을 만족하기까지 노심에서 인발된다(또는 삽입된다). 제어봉 구동장치(7)의 제어봉 위치검출기(8)의 출력인 위치신호  $H_{CR}(t)$ 는 블록(25E)에 전달된다. 여기서,  $H_{CR}(t)$ 는 제어봉(6) 선단위 위치이다. 블록(25E)는  $H_{CR}(t)$ 가 다음 식의 조건을 만족하는지 여부를 판단한다.

$$H_{CR0} - \Delta h < H_{CR}(t) < H_{CR0} + \Delta h \quad \text{.....(2)}$$

여기서,  $H_{CR0}$ 은 제어봉(6)의 초기위치 및  $\Delta h$ 는 제어봉(6)의 허용이동범위를 나타내고 있다. ( $H_{CR0} - \Delta h$ )는 제어봉(6)의 허용하한위치, ( $H_{CR0} + \Delta h$ )는 제어봉(6)의 허용상한위치를 각각 나타내고 있다. 위치신호  $H_{CR}(t)$ 가 (2)식의 조건을 만족하지 않을 때, 블록(25E)의 출력신호에 의해 개폐기(25F)가 닫힌다. (2)식의 조건이 만족되어 있을 때, 개폐기(25F)는 열려있다. 개폐기(25F)가 닫히면, (2)식의 조건을 만족시키지 않는 위치신호  $H_{CR}(t)$ 가 제어봉 위치수정장치(28)에 전달된다. 또, 제어봉 위치검출기(8)의 출력의 위치신호  $H_{CR}(t)$ 는 액체포이즌 제거·주입속도수정장치(26)에 전달된다.

액체포이즌 제거·주입속도수정장치(26)의 기능을 제7도에 의거하여 설명한다. 액체포이즌 제거·주입속도수정장치(26)는 원자로 출력통괄제어장치(33)에서 부하변경계획(37B)을 입력한다. 액체포이즌 제거·주입속도수정장치(26)는 후술하는 제어시간구분보다 매우 짧은 편차평균시간(예를들면 5분)내에 있어서의 제어봉(6) 조작에 의한 투입반응도(제어반응도의 예측치와 부하변경을 개시한 다음의 제어반응도의 실측치와의 차)에 대응하는 액체포이즌 제거·주입속도를 구하고, 이것에 의거하여 다음의 평균시간내에 있어서의 액체포이즌 제거·주입속도를 수정하는 것이다. 편차평균시간은 액체포이즌 제거·주입속도수정장치(26)내에 기억되어 있다. 스텝(26A)에서 편차평균시간  $\Delta t$ 이 경과했는지 여부를 판정한다. 편차평균시간  $\Delta t$ 이 경과했을 때, 제어봉 제어장치(25)에서 입력한 제어봉(6)의 위치신호  $H_{CR}(t)$ 를 기억한다(스텝 26B). 새로운 편차평균시간이 경과한 시점의 위치신호  $H_{CR}(t)$ 를  $H_1$ , 시간  $\Delta t$ 전에 기억한  $H_{CR}(t)$ 를  $H_0$ 라고 한다. 즉,  $H_1$  및  $H_0$ 는 노심축방향에 있어서 제어봉(6)의 하단이 위치하는 레벨이다. 편차평균시간  $\Delta t$ 내에 있어서의 제어봉(6)의 조작에 의한 투입반응도  $\Delta KC$ 를 다음 식으로 구한다(스텝 26C). 여기서,  $L$ 은 노심내에서의 제어봉(6)의 이동거리,  $\alpha$ 는 제어봉(6)의 단위길이 이동시에 있어서의 반응도이다.

$$\Delta KC = L \cdot \alpha = (H_1 - H_0) \alpha \quad \text{.....(3)}$$

다음에, 제어봉 투입반응도  $\Delta KC$ 를 등가의 반응도를 얻는 액체포이즌농도  $\Delta P$ (시간  $\Delta t$ 내에서의 액체포이즌 농도의 변화량)로 환산한다(스텝26D).

$$\Delta P = \Delta KC / \beta \quad \text{.....(4)}$$

여기서,  $\beta$ 는 액체포이즌의 단위농도당 반응도이다. 액체포이즌 농도  $\Delta P$ 에 의거하여, 다음의 편차평균

시간  $\Delta t$  내에 있어서의 액체포이즌 제거 · 주입속도의 수정분  $\Delta V_{CR}$ 을 다음 식에서 구한다(스텝 26E).

$$\Delta V_{CR} = \Delta P / \Delta t \quad \dots\dots\dots (5)$$

시간  $\Delta t$  전에 기억한  $\Delta V_{CR}$ 의 값 대신에 스텝(26E)에서 구한 새로운 수정분  $\Delta V_{CR}$ 을 스텝(26F)에서 기억한다. 이 수정분  $\Delta V_{CR}$ 의 값은 다음회 이후의 편차평균시간이 경과하고, 또한 제어봉(6)의 조작이 실시되기까지 액체포이즌 제거 · 주입속도수정장치(26)에서 액체포이즌 제거 · 주입속도결정장치(27)에 출력된다.

제어봉 위치수정장치(28)는 제어봉(6)의 위치를 소정 범위내에 두려고 하는 것이다. 그 상세한 기능을 제8도에 의거하여 설명한다. (2)식의 조건이 충족되지 않고 개폐기(25F)가 닫혔을 때, (2)식의 조건이 충족되어 있지 않은 위치신호  $H_{CR}(t)$ 가 제어봉 위치수정장치(28)에 입력되며, (6) 및 (7)식에서 제어봉(6)의 위치수정을 위해 액체포이즌을 제거할 것인가 또는 주입할 것인가를 판정한다(스텝 28A).

$$H_{CR} < H_{CR}^* - \Delta h \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$H_{CR}(t) > H_{CR}^* + \Delta h \quad \dots\dots\dots (7)$$

(6)식의 조건을 만족할 때는 액체포이즌이 제거되며, (7)식의 조건을 만족할 때는 액체포이즌이 주입된다.

(6)식의 조건을 만족할 때는 스텝(28B)에서 다음 식의 판정이 이루어진다.

$$H_{CR}(t) \geq H_{CR}^* - \Delta h \quad \dots\dots\dots (8)$$

(8)식의 판정이 NO일 경우, 액체포이즌의 주입속도신호  $V_{CR}^{IN}$ 가 출력된다(스텝 28C). (8)식의 조건이 만족되었을 때, 액체포이즌의 주입조작을 중지시키는 조작중지신호  $S_{IN}$ 가 출력된다(스텝 28D).

(7)식의 조건을 만족할 때에는 스텝(28E)에서 다음 식의 판정이 이루어진다.

$$H_{CR}(t) \leq H_{CR}^* + \Delta h \quad \dots\dots\dots (9)$$

(9)식의 판정이 NO일 경우, 액체포이즌 제거속도신호  $V_{CR}^{OUT}$ 가 출력된다(스텝 28F). (9)식의 조건이 만족되었을 때, 액체포이즌의 제거조작을 중지시키는 조작중지신호  $S_{OUT}$ 가 출력된다(스텝 28G). 주입속도신호  $V_{CR}^{IN}$ , 제거속도신호  $V_{CR}^{OUT}$  및 조작중지신호  $S_{IN}$  및  $S_{OUT}$ 는 상술한 바와같이 액체포이즌 제거 · 주입속도결정장치(27)에 출력된다.

액체포이즌 제거 · 주입속도결정장치(27)의 기능을 제9도에 의거하여 설명한다. 부하변경계획(37B)이 원자로 출력통괄제어장치(33)에서 액체포이즌 제거 · 주입속도결정장치(27)에 입력된다. 먼저, 스텝(27A)에서 부하변경계획(37B)에 대응하는 크세는 수밀도(數密度) 및 사마륨수밀도 등의 동적특성을 노심일점로(爐心一點爐) 모델에 의해 구한다. 즉, 이들의 수밀도의 변화는 다음에 나타낸 (10)-(13)식에서 구해진다("원자로 공학강좌 3원자로 물리" 일본 원자력연구소 원자로연구소 소장 이시모리편 p153, p155 참조).

$$\frac{dI}{dt} = \phi \Sigma_f Y_f - \lambda_s I \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{dX_e}{dt} = \phi \Sigma_f Y_e + \lambda_s I - (\lambda_s + \phi \sigma_a^s) X_e \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{dP_m}{dt} = \phi \Sigma_f Y_p - \lambda_p P_m \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{dS_m}{dt} = \phi \Sigma_f Y_s + \lambda_p P_m - (\lambda_s + \phi \sigma_a^s) S_m \quad \dots\dots\dots (13)$$

단  $t$ 는 시간,  $I$ 는 연료내의 옥소의 수밀도,  $X_e$ 는 연료내의 크세논의 수밀도,  $P_m$ 는 연료내의 프로메튬의 수밀도,  $S_m$ 은 연료내의 사마륨의 수밀도,  $\phi$ 는 연료내의 평균중성자속(中性子束),  $\Sigma_f$ 는 연료내의 매크로 흡수단면적,  $Y$ 는 각 원자의 핵분열에 의한 생성비율,  $\lambda$ 는 각 원자의 붕괴상수 및  $\sigma_a^s$ 는 각 원자의 매크로 흡수단면적이다.  $\Sigma_f$ ,  $Y$ ,  $\lambda$  및  $\sigma_a^s$ 등의 상기 연산에 필요한 데이터는 액체포이즌 제거 · 주입속도결정장치(27)내에 기억되어 있다. (10)-(13)식에 의거하여 구한 부하변경계획(37B)에 대응하는 크세논 및 사마륨의 수밀도의 변화를 제10도에 나타낸다. 다음에, 노심반응도의 변화를 스텝(27B)에서 구한다. 노심반응도의 변화는 크세논 및 사마륨의 수밀도의 변화에 대응하는 각 반응도변화와 노심출력의 변화에 대응하는 반응도변화의 합이다. 크세논, 사마륨의 수밀도의 변화 및 노심출력의 변화에 대응하는 각각의 반응도의 변화는 크세논, 사마륨의 수밀도의 변화 및 노심출력변화의 각각에 대한 비례계산으로 구할 수 있다. 노심반응도의 변화의 계산결과를 크세논 및 사마륨의 수밀도에 대응하는 각 반응도변화 및 노심출력의 변화에 대응하는 반응도(도프러, 보이데, 감속재온도 반응도)변화와 함께 제11도에 나타낸다.

스텝(27C)에서는 부하변경계획(37A)을 달성하는데 필요한 제어반응도 KB의 변화가 구해진다. 이 제어반응도 KB는 제12도에 나타난 것처럼 제11도에 나타난 노심반응도와는 절대치가 같고, 플러스, 마이너스의 부호가 노심반응도의 반대로 되어 있을 뿐이다. 즉, 노심반응도와는 반대의 부호의 반응도를 제어반응도로서 투입하면, 노심의 중성자의 발생수와 흡수수가 잘 균형되어, 목표의 부하변경계획을 달성할 수 있다.

제어시간구분이 스텝(27D)에 의해 결정된다. 제13도에 나타난 것처럼 제어반응도 KB를 시간구분반응도  $\Delta K_i$ 를 사용하여 분할하고, 그것에 대응한 시간  $T_i - T_n$ 으로 제어시간구분을 행한다. 장기 시간구분반응도  $\Delta K_i$ 는 부하변경계획(37A)과 함께 조작반(34)에서 부하추종제어장치(24)에 전달된다. 그리고, 부하변경계획(37B)에 있어서, 원자로출력의 강하가 개시되는 시간, 강하를 종료한 시간, 원자로출력의 상승개시 시간 및 그 종료시간은 제어시간구분의 시간으로 되도록 한다.

스텝(27D)에서 결정된 각각의 제어시간구분에 대한 포이즌 제거·주입기준속도  $V_{base}$ 가 스텝(27E)에서 구해진다. 시간  $T_n$ 으로부터  $T_{n+1}$ 까지의 기간에 있어서의 포이즌 제거·주입기준속도  $V_{base}(T_n - T_{n+1})$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$V_{base}(T_n \sim T_{n+1}) = \frac{KB(T_{n+1}) - KB(T_n)}{T_{n+1} - T_n} \cdot \frac{1}{j} \quad (14)$$

단,  $T_n$ 은  $n$ 회째 및  $T_{n+1}$ 은  $(n+1)$ 회째의 제어시간구분 개시시간이며,  $KB(T_{n+1}) - KB(T_n)$ 은 시간  $T_n$ 으로부터 시간  $t_{n+1}$ 까지의 사이에 주입할 반응도이며,  $j$ 는 액체포이즌의 단위농도당 반응도이다. 상기  $j$ 는 제14도에 나타난 중수중의 액체포이즌 농도와 액체포이즌에 의한 반응도와 관계에 의하여 구해진다. 스텝(27E)에서 각 제어시간구분에 대응하여 얻어진 포이즌 제거·주입기준속도  $V_{base}$ 의 계산결과를 제15도에 나타낸다. 중축의 0보다 위쪽인 플러스의 값이 액체포이즌의 주입, 0보다 아래쪽인 마이너스의 값이 그 제거를 나타내고 있다. 이 계산결과는 부하변경계획(37B)에 대응하는 것이다.

스텝(27E)의 출력신호, 즉 제15도에 도시된 속도신호는 스텝(27F)에 보내진다. 또, 스텝(27F)에는 액체포이즌 제거·주입속도수정장치(26)로부터의 출력신호  $\Delta V_{CR}$ 가 입력된다. 포이즌 제거·주입기준속도  $V_{base}$ 는 스텝(27F)에 있어서 액체포이즌 농도의 변화비율인 수정분  $\Delta V_{CR}$ 에 의해 수정된다. 수정후의 액체포이즌 제거·주입속도를  $V_0$ 라고 하면,  $V_0$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$V_0(t) = V_{base}(t) + \Delta V_{CR}(t) \quad (15)$$

로 수정된 액체포이즌 제거·주입속도  $V_0(t)$ 가 스텝(27G)에 입력된다. 제어봉 위치수정장치(28)로부터의 주입속도신호  $V_{CR}^{IN}$  또는 제거속도신호  $V_{CR}^{OUT}$ 가 스텝(27G)에 입력되지 않을 때에는 스텝(27G)은 액체포이즌 제거·주입속도  $V_0(t)$ 를 액체포이즌 제거장치(29A) 또는 액체포이즌 주입제어장치(29B)에 출력한다. 즉,  $V_0(t)$ 가 마이너스의 값인 경우는 액체포이즌 제거제어장치(29A)에,  $V_0(t)$ 가 플러스가 값인 경우는 액체포이즌 주입제어장치(29B)에 출력된다. 주입속도신호  $V_{CR}^{IN}$  또는 제거속도신호  $V_{CR}^{OUT}$ 가 스텝(27G)에 입력되었을 때는  $V_0(t)$ 가 스텝(27G)로부터 출력되었다하더라도,  $V_0(t)$  대신에 주입속도신호  $V_{CR}^{IN}$ 가 우선적으로 스텝(27G)에서 액체포이즌 주입제어장치(29B)에 출력되며, 또는 제거속도신호  $V_{CR}^{OUT}$ 가 우선적으로 액체포이즌 제거제어장치(29A)에 출력된다. 주입속도신호  $V_{CR}^{IN}$ 는 제어봉 위치수정장치(28)로부터 조작중지신호  $S_{IN}$ 가 스텝(27G)에 입력된 시점에서, 제거속도신호  $V_{CR}^{OUT}$ 는 조작중지신호  $S_{OUT}$ 가 입력된 시점에서 그 효력을 상실한다. 즉, 신호  $V_0(t)$ 의 스텝(27G)으로부터의 출력이 계속해서 개시된다.

투입반응도 계산장치(31)의 기능을 제16도에 의거하여 설명한다. 투입반응도 계산장치(31)는 실제로 노심에 삽입되어 있는 제어봉(6)의 위치 및 감속재인 중수중의 액체포이즌농도에 의거하여 시간  $t$ 에 있어서 노심에 투입되어 있는 투입반응도  $K(t)$ 를 구하고, 그 투입반응도  $K(t)$ 의 제어시간구분인 시간  $T_{n-1}$ 에서  $T_n$ 까지 변화  $\Delta K(T_{n-1} - T_n)$ 에 의해 다음 날의 시간  $T_{n-1}$ 에서  $T_n$ 까지의 액체포이즌의 주입 또는 제거속도  $V(T_{n-1} - T_n)$ 를 구한다. 이들 연산을 상세히 설명한다.

각 제어봉 위치검출기(8)의 출력신호인 각각의 제어봉(6)의 위치 신호  $H_{CR}(t)$ 가 투입반응도 계산장치(31)에 각각 입력된다. 액체포이즌주입장치(9)의 액체포이즌농도계(14)의 출력신호  $a$  및 유량계(15)의 출력신호  $W_1$ 는 액체포이즌 주입제어장치(29B)를 통해서 투입반응도 계산장치(31)에 입력된다. 또한, 액체포이즌 제거장치(16)의 유량계(21)의 출력신호  $W_2$ 는 액체포이즌 제거제어장치(29A)를 통해 투입반응도 계산장치(31)에 입력된다(스텝31A). 시간  $t$ 까지의  $\Delta t5$ ( $a$ 를들면 5분)간에 이동한 제어봉(6)의 개수  $n$ 를 각각의 제어봉(6)의 시간  $t$ 에 있어서의 위치신호  $H_{CR}(t)$ 로 구한다(스텝 31B). 제어봉(6)이 이동했는지 여부는  $H_{CR}(t) = H_{CR}(o)$  또는  $H_{CR}(t) \neq H_{CR}(o)$ 이면 제어봉(6)은  $\Delta t_a$ 간에서 이동하고 있으며,  $H_{CR}(t) \neq H_{CR}(o)$ 의 어느것에 해당하는가에 따라 판정한다.  $H_{CR}(t) = H_{CR}(o)$ 이면 제어봉(6)은 이동하고 있지 않다. 여기서  $H_{CR}(o)$ 는 시간  $t$ 보다  $\Delta t_a$ 전의 시간에 있어서의 제어봉(6)의 위치이다. 시간  $\Delta t_a$ 는 투입반응도 계산장치(31)의 메모리에 기억시켜둔다. 또,  $\Delta t_a$ 는 조작반(34)에서 입력해도 좋고, 임의의 값을 선택할 수 있다.  $\Delta t_a$ 간에 이동한 전체 제어봉(6)에 의해 노심에 투입되는 투입반응도  $C(t)$ 를 구한다(스텝 31C). 먼저 이동한 하나



의 제어봉(6)에 의해 투입된 투입반응도  $C_0(t)$ 는 다음 식과 같이 표시된다.

$$C_{0i}(t) = C_{Ai}(t) - C_{Ai}(0) \dots\dots\dots (16)$$

여기서,  $C_{Ai}(t)$ 는  $H_{CR}(t)$ 에 대응하는 제어봉 반응도이며,  $C_{Ai}(0)$ 는  $H_{CR}(0)$ 에 대응하는 제어봉 반응도이다.  $i$ 는 1, 2, ...,  $n$ 이며, 이동한 제어봉(6)에 대한 번호이다.  $C_{Ai}(t)$  및  $C_{Ai}(0)$ 는 제17도의 특성에 의거하여 제어봉(6)의 위치, 즉  $H_{CRi}(t)$ ,  $H_{CRi}(0)$ 에 대응하는 값으로 된다.

$$C(t) = \sum_{i=1}^n C_{0i} \dots\dots\dots (17)$$

로 된다.  $\Delta t_a$ 간에 노심에 삽입된 제어봉(6)에 의한 투입반응도 보다도 노심에서 인발된 제어봉(6)에 의한 투입반응도가 큰 경우는  $C(t)$ 는 플러스의 값으로 된다. 전자의 투입반응도가 후자의 투입반응도 보다도 큰 경우는  $C(t)$ 는 마이너스의 값으로 된다. 시간  $t$ 까지의  $\Delta t_a$ 간에 있어서의 액체포이즌주입시간  $\Delta T_1$  및 액체포이즌 제거시간  $\Delta T_2$ 을 구한다(스텝 31D). 이들 시간  $\Delta T_1$  및  $\Delta T_2$ 은 구체적으로는 다음과 같이 구한다. 액체포이즌 주입조작의 실시, 미실시의 판별 및 액체포이즌 제거조작의 실시, 미실시의 판별은 유량신호  $W_1$  및  $W_2$ 에 의거하여 행한다. 각각의 조작이 실시되고 있지 않을 경우에는 유량신호  $W_1$  및  $W_2$ 가 각각 0으로 되며, 각각의 조작이 실시되고 있을 경우에는 각각의 신호가 0보다 큰 값을 나타낸다.

$\Delta t_a$ 간에 있어서의 액체포이즌 주입시간  $\Delta T_1$ 은 다음의 (i)-(iv)와 같이 결정된다. 여기서, 시간  $\Delta t_b$  및  $\Delta t_c$ 은  $\Delta t_a > \Delta t_b > \Delta t_c$ 의 관계에 있는 것으로 한다.

(i) 시간  $(t - \Delta t_b)$ 으로부터 시간  $t$ 까지의 사이에서  $W_1 > 0$ 일 때  $\Delta T_1 = \Delta t_b$

(ii) 시간  $\Delta t_a$ 사이에서  $W_1 > 0$ 일 때,  $\Delta T_1 = \Delta t_a$

(iii) 시간  $(t - \Delta t_a)$ 으로부터 시간  $(t - \Delta t_b)$ 까지의 사이에서  $W_1 > 0$ 일 때,  $\Delta T_1 = \Delta t_a - \Delta t_b$

(iv) 시간  $(t - \Delta t_b)$ 으로부터 시간  $(t - \Delta t_c)$ 까지의 사이에서  $W_1 > 0$ 일 때,  $\Delta T_1 = \Delta t_b - \Delta t_c$

또,  $\Delta t_a$ 간에 있어서의 액체포이즌 제거시간  $\Delta T_2$ 은 다음의 (v)-(viii)와 같이 결정된다.

(v) 시간  $(t - \Delta t_b)$ 으로부터 시간  $t$ 까지의 사이에서  $W_2 > 0$ 일 때,  $\Delta T_2 = \Delta t_b$

(vi) 시간  $\Delta t_a$ 사이에서  $W_2 > 0$ 일 때,  $\Delta T_2 = \Delta t_a$

(vii) 시간  $(t - \Delta t_a)$ 으로부터 시간  $(t - \Delta t_b)$ 까지의 사이에서  $W_2 > 0$ 일 때,  $\Delta T_2 = \Delta t_a - \Delta t_b$

(viii) 시간  $(t - \Delta t_b)$ 으로부터 시간  $(t - \Delta t_c)$ 까지의 사이에서  $W_2 > 0$ 일 때,  $\Delta T_2 = \Delta t_b - \Delta t_c$

스텝(31E)은 스텝(31D)에 있어서 구해진 액체포이즌 주입시간  $\Delta T_1$  및 액체포이즌 제거시간  $\Delta T_2$ 을 사용하여,  $\Delta t_a$ 간에 액체포이즌의 농도조절에 의해 투입된 투입반응도  $P(t)$ 를 계산한다. 이 연산은 다음 식으로 행한다.

$$P(t) = f(a, \Delta T_1) + f(W_2, \Delta T_2) \dots\dots\dots (18)$$

$f(a, \Delta T_1)$  및  $f(W_2, \Delta T_2)$ 는 제18도의 특성에 의거하여 구해진다. 전자의 값은 제18도의 실선의 특성으로부터, 후자의 값은 제18도의 파선의 특성으로부터 구해진다. 실선의 특성은 주입되는 액체포이즌 농도  $a$ 를 파라미터로 하고, 파선의 특성은 액체포이즌 제거량(18)에 공급되는 유량  $W_2$ 을 파라미터로 하여 표시되어 있다.  $P(t)$ 의 값은 액체포이즌 제거에 수반하는 투입반응도가 액체포이즌 주입에 수반하는 투입반응도보다도 클 경우에 플러스의 값으로 되며, 그 투입반응도의 크기가 반대일 경우에 마이너스의 값으로 된다.

원자로출력(원자로 열출력)은 연료의 연소도가 커짐에 따라서 연료의 열화 등에 노심출력계수의 변화의 영향을 받아 서서히 변화한다. 이와 같은 원자로 출력의 변화량은 부하추종운전개시 초기에 있어서는 얼마 안되는 양이다. 그러나, 부하추종운전 개시 후 80일에서는 그 누계량은 큰 것으로 된다. 즉, 80일째에 있어서의 원자로 출력의 변화량은 제어봉을 1440회 조작했을 때 변화하는 원자로 출력의 변화량과 같다. 1일당 제어봉 조작회수로 하면 18회이다. 18회의 제어봉 조작에 의해 1일에 투입되는 투입반응도를 시간  $\Delta t_a$ 마다 분당시킴으로써, 노심출력계수에 의한 원자로 출력의 변화를 보장할 수 있다. 시간  $t$ 에 있어서의 투입반응도의 보정량  $m(t)$ 은 다음 식에 의해 구한다(스텝 31F).

$$m(t) = \Delta PK \cdot \Delta POWER(t) \dots\dots\dots (19)$$

여기서,  $\Delta PK$ 는 원자로 출력 1% 변화당 노심반응도의 1일당 변화이며,  $\Delta POWER(t)$ 는 시간  $t$ 까지의  $\Delta t_a$ 사이에 있어서의 원자로 출력변화를 나타내고 있다.

다음에,  $\Delta t_a$ 경과후의 시간  $t$ 에 있어서의 노심에의 전체 투입반응도  $\Delta K(t)$ 를 다음 식에 의해 구한다(스

템 31G).

$$\Delta K(t) = C(t) + P(t) + m(t) \dots\dots\dots (20)$$

제어시간구분  $T_n$ 을 결정한다(스텝 31H). 즉, 현재의 시간  $t$ 이 제어시간 구분  $T_m$ 이다. 시간  $t$ 으로부터  $\Delta t_a$ 전의 시간  $(t - \Delta t_a)$ 이 제어시간구분  $T_{n-1}$ 으로 된다.

다음 날의 같은 제어시간구분  $T_{n-1}$ 으로부터  $T_n$ 까지의 시간  $\Delta t_a$ 의 사이에서의 액체포이즌 제거 · 주입속도  $V(T_{n-1}-T_n)$ 를 다음 식에서 구한다(스텝 32I).

$$V(T_{n-1} \sim T_n) = \frac{\Delta K(t)}{T_n - T_{n-1}} \times \frac{1}{\alpha} (\text{ppm/min}) \dots\dots\dots (21)$$

여기서,  $\alpha$ 는 액체포이즌 농도의 환산치( $\Delta K/\text{ppm}$ )이다. 부하변경계획(37B)의 원자로 출력강하개시시 이후의 제어시간 구분에 대해서 얻어진 액체포이즌 제거 · 주입속도  $V(T_{n-1}-T_n)$  및 투입반응도  $\Delta K(T_{n-1}-T_n)$ 는 액체포이즌 제거 · 주입속도지시장치(32)에 입력된다.

액체포이즌 제거 · 주입속도지시장치(32)를 제19도에 나타낸다. 액체포이즌 제거 · 주입속도지시장치(32)는 제어시간구분  $T_1, T_2, \dots, T_{n-1}-T_n$ 에 대응하는 액체포이즌 제거 · 주입속도  $V(T_0-T_1), V(T_1-T_2), \dots, V(T_{n-1}-T_n)$  및  $\Delta K(T_0-T_1), \Delta K(T_1-T_2), \dots, \Delta K(T_{n-1}-T_n)$ 의 값을 투입반응도 계산장치(31)에서 입력하고(스텝 32A), 이들 값을 기억장치(자기 디스크, 자기드럼 등)내에 기억시킨다(스텝 32B). 제어시간구분  $T_1, T_2, \dots, T_n$ 이란 부하추종운전을 개시시로부터  $T_1$ 까지의 기간,  $T_1$ 으로부터  $T_2$ 까지의 기간,  $\dots, T_{n-1}$ 으로부터  $T_n$ 까지의 기간을 의미한다.  $V(T_{n-1}-T_n)$ 의 값은 다음날의 시간  $T_{n-1}$ 으로부터  $T_n$ 까지의 값인데 대해  $\Delta K(T_{n-1}-T_n)$ 의 값은 금일의 시간  $T_{n-1}$ 으로부터  $T_n$ 까지의 값이다. 이들 값은 매일 투입반응도 계산장치(31)에서 입력되어 상술한 기억장치내에 기억된다.

다음에, 금일과 그 전날에 있어서의 부하추종운전하여 원자로 출력 강하개시시로부터 30분(임의의 시간) 경과시까지의 투입반응도  $\Delta K(T_0-T_6)$ 를 구한다(스텝 32C). 전날의 투입반응도  $\Delta K_y(T_0-T_6)$ 는 기억장치내에 기억되어 있는 전날의  $\Delta K(T_0-T_1), \dots, \Delta K(T_5-T_6)$ 를 가산한 것이다. 금일의 투입반응도  $\Delta K_t(T_0-T_6)$ 는 기억장치내에 기억되어 있는 금일의  $\Delta K(T_0-T_1), \dots, \Delta K(T_5-T_6)$ 를 가산한 것이다. 투입반응도는 제12도에 나타낸 부하변경계획(37A)을 달성하는데 필요한 제어반응도이다. 부하변경계획(37A)에 의거한 부하추종운전을 개시한 최초의 날에 대한  $\Delta K_t(T_0-T_6)$ 는 구해지지만, 그 전날의  $\Delta K_y(T_0-T_6)$ 는 당연히 0으로 된다.  $\Delta K_t(T_0-T_6)$  및  $\Delta K_y(T_0-T_6)$ 를 구한 다음, 이들 값을 비교한다(스텝 32D). 이 비교는 다음 식으로 행한다.

$$0.99\Delta K_y(T_0 - T_6) \leq \Delta K_t(T_0 - T_6) \leq 1.01\Delta K_y(T_0 - T_6) \dots\dots\dots (22)$$

$\Delta K_t(T_0-T_6)$ 가 (22)식을 만족하지 않을 때는 스텝(32D)에서 NO신호가 출력된다. NO신호는 원자로 출력통괄제어장치(33)에 입력된다. 원자로 출력통괄제어장치(33)는 NO신호를 입력함으로써 개폐기(35)를 닫은 채로 유지한다. 즉,  $\Delta K_t(T_0-T_6)$ 가 (22)식을 만족하지 않을 때는 부하추종제어장치(24)에 의한 부하추종운전, 즉 수정기능을 갖는 예측 ((10)-(11)식에 의한 예측)에 의거한 부하추종운전(제9도)이 금일의 시간  $T_6$ 이후에 있어서도 계속해서 실시된다.

$\Delta K_t(T_0-T_6)$ 가 (22)식을 만족할 때에는 스텝(32D)에서 YES신호가 출력된다. YES신호의 출력은 엄밀하게는  $\Delta K_t(T_0-T_6) = \Delta K_y(T_0-T_6)$ 의 경우에 행하는 것이 바람직하다. 그러나, 실제로는 검출기의 출력신호 등에 오차가 포함되어 있으므로,  $\Delta K_t(T_0-T_6)$ 와  $\Delta K_y(T_0-T_6)$ 의 비교는 (22)식에 표시된 것처럼  $\pm 1\%$ 의 허용범위내에서 행해도 아무런 지장이 없다.  $\Delta K_t(T_0-T_6)$ 는  $\Delta K_y(T_0-T_6)$ 에 비해 보정분  $m(t)$ 의 차만큼 커지지만, 그 차는 1일의 차이만으로는 얼마 안되는 것이며,  $\pm 1\%$  내에 포함된다. YES신호가 출력되면, 스텝(32E)에 있어서 기억장치에 기억되어 있는 전날 구한(제16도의 스텝 31I에서 구한)액체포이즌 제거 · 주입속도  $V(T_{n-1}-T_n)$ 이며, 시간  $T_7$ 이후의 액체포이즌 제거 · 주입속도를 기억장치로부터 금일의 시간의 경과에 대응하여 순차 호출한다. 호출된 액체포이즌 제거 · 주입속도  $V(T_{n-1}-T_n)$ 는 액체포이즌 제거속도  $V_{out}(T_{n-1}-T_n)$ 와 액체포이즌 주입속도  $V_{in}(T_{n-1}-T_n)$ 로 나누어 별도로 출력된다(스텝 32F). 액체포이즌 제거속도  $V_{out}(T_{n-1}-T_n)$ 는 마이너스의 값이며, 액체포이즌 제거제어장치(29A)에 전달된다. 액체포이즌 주입속도  $V_{in}(T_{n-1}-T_n)$ 는 플러스의 값이며, 액체포이즌 주입제어장치(29B)에 전달된다.

YES신호는 스텝(32D)에서 출력되는 동시에 원자로 출력통괄 제어장치(33)에 입력된다. 원자로 출력통괄 제어장치(33)는 YES신호를 입력하면, 개폐기(35)를 연다. 따라서,  $\Delta K_t(T_0-T_6)$ 가 (22)식을 만족할 경우는 부하추종제어장치(30)에 의한 부하추종제어가 실시된다. 일정부하추종제어장치(30)에 의한 부하추종제어가 실시된다. 일정부하추종 제어장치(30)에 의한 부하추종제어는 부하변경계획(37A)에 의거한 부하추종운전이 실시되며,  $\Delta K_t(T_{n-1}-T_n)$ 가 (22)식을 만족할 동안 실시된다. 일정부하추종 제어장치(30)에 의한 부하추종제어가 실시될 경우는 액체포이즌 제거 · 주입속도 지시장치(32)는 투입반응도 계산장치(31)의 스텝(31I)에서 구한 전날의 투입반응도에 의거한 액체포이즌 제거 · 주입속도  $V(T_{n-1}-T_n)$ 를 기억장치에서 호출하여 항상 액체포이즌 제거제어장치(29A) 또는 액체포이즌 주입제어장치(29B)에 출력한다.

이상 본 실시예의 부하추종제어장치의 기능을 설명했지만, 이 부하추종제어장치에 의한 부하추종운전방법을 시간의 경과와 함께 설명한다.



전기출력 100%를 얻기 위해 운전되고 있는 압력관형 원자로에 대해 부하변경계획(37A)에 의거한 부하추종운전을 실시하기 위해 운전원은 조작반(34)을 조작한다. 이 지령은 조작반(34)에서 원자로 출력통괄제어장치(33)에 전해지며, 개폐기(35)가 닫힌다. 원자로 출력통괄제어장치(33)는 전기출력에 의한 부하변경계획(37A)을 원자로 출력(원자로 열출력)에 의한 부하변경계획(37B)으로 변환하여, 부하추종제어장치(24)에 출력한다.

부하추종제어장치(24)의 액체포이즌 제거·주입속도결정장치(27)는 제9도의 스텝(27A)~(27E)에 의거하여 액체포이즌 제거·주입기준속도  $\Delta V_{base}$ 를 산출한다. 부하변경계획(37B)에 의한 부하추종운전이 개시되어 원자로 출력강하가 시작된 직후에 있어서는,  $\Delta V_{CR}(t)$ 가 0이므로  $V_0(t)=V_{base}$ 로 되며,  $V_{base}$ 에 의거한 액체포이즌의 주입이 실시된다. 즉, 플러스의 값인  $V_0(t)$ 가 액체포이즌 주입제어장치(29B)에 입력되며, 액체포이즌 주입제어장치(29B)는 스톱밸브(12)를 여는 동시에 유량조절밸브(13)를 소정 개폐도로 하여 액체포이즌탱크(11)내의 액체포이즌을 배관(10)을 통해 중수순환배관(5)내에 공급한다. 액체포이즌 주입제어장치(29B)는 유량계(15)의 출력신호  $W_1$ 를 입력하여 유량조절밸브(13)의 개폐도를 조절하며, 소정의  $V_0(t)$ 가 달성되도록 피드백제어를 행하고 있다.

공급된 액체포이즌은 중수와 함께 가열유체탱크(1)내에 도입되어, 원자로 출력의 저하에 기여한다. 액체포이즌의 주입에 의해 원자로 출력이 저하되기 시작하면 노심내의 크세논 수밀도의 영향을 받아 원자로 출력은 기존선인 부하변경계획(37B)에서 벗어나 상한치(38)보다 상승 또는 하한치(39)보다 저하되려고 한다. 이것은 (10)~(13)식의 노심일점모델에 의한 출력변화의 예측이 실제의 변화와 어긋나 있는 것을 의미한다. 이 경우는 부하추종제어장치(24)의 제어봉제어장치(25)의 블록(25C)의 기능이 작용하여 제어봉구동장치(7)가 구동된다. 이 때문에, 그것에 연결된 제어봉(6)은 노심에 삽입되거나 또는 노심에서 인발되어, 원자로 출력이 상한치(38)와 하한치(39) 사이가 되도록 조절된다. 이 제어봉(6)의 이동에 의한 투입반응도는 액체포이즌 제거·주입속도수정장치(26)의 스텝(26A)~(26E)의 기능에 의해 얻어진 다음의 편차평균시간  $\Delta t$ (5분간)의 액체포이즌 제거·주입속도수정분  $V_{CR}(t)$ 으로서 액체포이즌 제거·주입속도결정장치(27)의 스텝(27F)에서 기준속도  $V_{base}(t)$ 에 가산된다. 다음의 편차평균시간  $\Delta t$ 내에서는  $\Delta V_{CR}(t)$ 가 가미된  $V_0(t)$ 에 의거하여 중수중의 액체포이즌의 주입이 행해진다. 제어봉(6)의 조작에 의한 투입반응도는 액체포이즌 농도 변화에 의해 보상할 수 있으므로, 다음의 편차평균시간 이후에 있어서의 제어봉조작의 회수가 감소된다.

투입반응도 계산장치(31)는 제어봉위치신호  $H_{CR}(t)$ , 액체포이즌 농도신호  $a$ , 유량신호  $W_1$ ,  $W_2$ 를 입력하여 스텝(31B)~(31I)의 연산처리를 행하고, 다음 날의  $T_{n-1}$ 으로부터  $T_n$ 의  $\Delta t_a$  사이에 있어서의 액체포이즌 제거·주입속도( $T_{n-1}-T_n$ )를 구하고 있다.

얻어진 값은 항상 액체포이즌 제거·주입속도지시장치(32)의 스텝(32B)에서 기억장치내에 기억된다. 또, 원자로 출력강하시( $T_0$ )로부터 30분 ( $T_0$ )을 경과한 시점에서 스텝(32C)에 나타난 것처럼 투입반응도  $\Delta K_i(T_0-T_0)$ 를 구한다. 부하추종운전을 개시한 시점은 부하추종운전의 제1일째이며, 전날의 투입반응도  $\Delta K_y(T_0-T_0)$ 는 0이다. 따라서, 액체포이즌 제거·주입속도 지시장치(32)는 원자로 출력통괄제어장치(33)에 N0신호를 출력한다. 이 때문에 개폐기(35)는 닫힌 채이며, 제1일째의 부하추종운전은 부하추종제어장치(24)로 제어된다.

부하추종운전개시후 1시간을 경과하면, 제15도에 나타난 것처럼 액체포이즌의 제거조작이 실시된다. 액체포이즌의 제거조작은 마이너스의 값인  $V_0(t)$ 가 액체포이즌 제거·주입속도 결정장치(27)로부터 액체포이즌 제거제어장치(29A)에 입력됨으로써 실시된다. 마이너스의  $V_0(t)$ 를 입력한 액체포이즌 제거제어장치(29A)는 스톱밸브(19) 및 (20)을 열어, 유량조절밸브(22)의 개폐도를  $V_0(t)$ 가 얻어지도록 감소시킨다. 액체포이즌 제거제어장치(29A)는 유량계(21)의 출력신호  $W_2$ 를 입력하여  $V_0(t)$ 의 피드백제어를 행한다.

중수중의 액체포이즌은 제거탑(18)내의 이온교환수지에 의해 제거되므로, 중수중의 액체포이즌농도가 저하된다. 이 때문에, 크세논농도의 저하에 의한 원자로 출력의 저하가 보상되며, 원자로 출력은 일정하게 유지된다. 원자로 출력을 상한치(38)와 하한치(39)의 사이에 유지하기 위해 제어봉(6)을 조작한 경우는 수정분  $\Delta V_{CR}(t)$ 이 구해지고, 다음의 편차평균시간의  $\Delta t$  이후의 액체포이즌의 농도제어에 고려되는 것은 상술한 바와 마찬가지로이다. 원자로 출력을 일정하게 유지하는 1~9시간의 사이에서는 크세논농도의 변화에 따라서 액체포이즌의 제거 및 주입이 실시된다.

저출력운전이 끝나고 원자로 출력을 고출력까지 상승시킬 경우는 액체포이즌 제거·주입속도결정장치(27)로부터 출력되는 마이너스의  $V_0(t)$ 에 의거하여 액체포이즌 제거장치(16)가 조작된다.

원자로 출력이 고출력에 달하면, 최초의 동안은 액체포이즌 주입장치(9), 시간이 경과하면 액체포이즌 제거장치(16)가 조작되며, 원자로 출력이 100%로 유지된다. 당연히 액체포이즌의 농도제어에는 수정분  $\Delta V_{CR}(t)$ 도 가미되어 있다.

제1일째(부하추종운전개시시로부터 24시간의 동안)의 부하추종운전(제1부하변동사이클에 의한 부하추종운전)의 실시에 있어서 제어봉(6)이 초기위치(기준위치)  $H_{CR}$ 를 중심으로 한 허용이동범위를 일탈했을 경우에는 제어봉위치수정장치(28)에 의해 그 일탈분을 보상도록 스텝(28C) 및 (28F)과 같이 액체포이즌농도의 변화속도가 지시된다. 이 변화속도는 액체포이즌 제거·주입속도결정장치(27)에서 액체포이즌 제거제어장치(29A) 또는 액체포이즌 주입제어장치(29B)에 출력된다. 따라서, 상기 일탈분에 의한 투입반응도는 액체포이즌 농도변화에 의한 투입반응도로 치환되며, 제어봉(6)은 허용이동범위내로 귀환된다. 상기

제1 사이클에 있어서의 제1 제어수단의 조작에 의해 투입된 반응도를 제1 반응도라고 하고, 제2 제어수단의 조작에 의해 투입된 반응도를 제2 반응도라고 한다.

제2일째의 부하추종운전(제2 부하변동사이클에 의한 부하추종운전)은 30분 경과시까지 부하추종제어장치(24)에 의해 예측결과 ( $\Delta V_{CR}(t)$ 에 의해 수정되어 있음)에 의거하여 실시된다. 제2일째의 투입반응도인  $\Delta K_t(T_0-T_6)$ 와 제1일째의 투입반응도인  $\Delta K_y(T_0-T_6)$ 를 액체포이즌 제거·주입속도지시장치(32)의 스텝(32D)에서 비교한다. 제1도의 특성 4에서 명백한 것처럼 제1일째의 최초의 30분간의 투입반응도보다도 제2일째의 그 투입반응도가 매우 커져 있다. 투입반응도는 특성 4의 노심반응도와는 절대치가 같으며, 단지 플러스, 마이너스의 부호의 노심반응도를 반대로 한 것이다. 따라서  $\Delta K_y(T_0-T_6)$ 와  $\Delta K_t(T_0-T_6)$ 의 비교를 투입반응도가 아니라 노심반응도로 해도 좋다.

제1일째의 투입반응도와 제2일째의 투입반응도가 다르므로, 제1일째에 구한 제2일째의 제어시간구분  $T_n$ 의 액체포이즌 제거·주입속도가 상술한 것처럼 기억장치내에 기억되어 있지만, 제2일째의  $T_6$  이후에 있어서는 부하추종제어장치(24)에 의한 예측결과에 의해 운전이 실시된다. 상기 제1 및 제2반응도에 따라서 상기 제2사이클에 있어서 제2제어수단의 조작에 의해 설정될 예측반응도를 제3반응도라고 한다.

제3일째의 부하추종운전(제3부하변동사이클에 의한 부하추종운전)은 30분 경과시까지의 제2일째와 마찬가지로 부하추종제어장치(24)에 의해 실시된다. 30분 경과시점에서 제2일째의 투입반응도인  $\Delta K_y(T_0-T_6)$ 와 제3일째의 투입반응도인  $\Delta K_t(T_0-T_6)$ 를 스텝(32D)에서 비교한다. 제1도의 특성 4에서 명백한 것처럼 양자의 값은 같다. 따라서, 액체포이즌 제거·주입속도지시장치(32)로부터 원자로 출력통괄제어장치(33)에서 YES 신호가 출력되어 개폐기(35)가 열리고, 부하추종제어장치(24)에 의한 예측제어가 종료된다.

그 다음은 액체포이즌 제거·주입속도지시장치(32)에서 출력되는 액체포이즌 제거·주입속도  $V(T_{n-1}-T_n)$ 에 의거하여 부하추종운전이 실시된다. 이 부하추종운전은 전날에 실제로 투입된 반응도에 의거한 것이다. 따라서, 투입되는 반응도가 전날의 그것과 같을 경우는 전날의 실제의 투입반응도에 의거하여 구한 액체포이즌 제거·주입속도  $V(T_{n-1}-T_n)$ 에 의해 부하추종운전을 실시하는 편이 예측계산 등을 행할 필요가 없어진다. 그만큼 크세논농도 등을 고려한 부하추종운전이 용이해지고, 더욱 원자로의 안전성이 증대한다. 또, 다음 날의 부하추종운전시에 있어서의 제어봉(6)의 조작회수가 매우 적어진다. 이것은 연료파손을 일으키는 확률을 현저하게 저하시키는 것이다.

제4일째 이후의 부하추종운전은 모두 액체포이즌 제거·주입속도지시장치(32)의 출력에 의거하여 행해진다.

이상에 기술되어 있는 액체포이즌 제거·주입속도라 함은 액체포이즌 농도변화속도를 의미하고 있다. 액체포이즌 주입은 액체포이즌 농도의 증가이며, 액체포이즌 제거는 액체포이즌 농도의 감소이다.

상술한 본원 발명의 실시에는 가압수형 원자로에 적용가능하다. 가압수형 원자로도 제어봉조작과 액체포이즌 농도조절에 의해 원자로 출력을 제어하고 있다. 이 실시예를 제20도에 의거하여 설명한다.

가압수형 원자로의 원자로 용기(50), 노심부(51), 하부노심지지판(52), 하부노심지지판(52)을 지지하는 노심조(53)와 노심부(51)와의 사이에 배치되는 버퍼판(54), 노심조(53)와 원자로 용기(50)와의 사이에 존재하는 열차폐(55), 제어봉이 삽입되는 다수의 제어관(56), 노심부(51)에 배치되는 연료집합체(57)로 이루어진다. 제어봉은 위치검출기(8)를 갖는 제어봉구동장치(7)에 연결된다. 중성자검출기(23)가 노심부(51)에 배치된다.

원자로 용기(50)는 커버(60), 입구노즐(59) 및 출구노즐(58)을 갖고 있다. 액체포이즌을 함유하는 냉각수는 펌프(61)를 구동함으로써 1차 냉각계 배관(62)에서 입구노즐(59)을 통해서 원자로 용기(50)내의 하부프레임(68)에 유입한다. 또한, 냉각수는 노심부(51)에 보내진다. 노심부(51)에서 가열된 냉각수는 상부프레임(67), 출구노즐(58)을 통해서 1차 냉각계 배관(62)으로 토출된다. 고온의 냉각수는 증기발생기(63)의 전열관(65)내에 도입된다. 증기발생기(63)의 셀측에는 급수배관(64)에서 급수가 공급된다. 급수와 고온의 냉각수와의 사이에서 열교환이 행해지며, 급수는 증기로 되어 주증기관(66)으로 유출한다.

1차 냉각계 배관(62)에는 상술한 실시예와 동일 구조의 액체포이즌 주입장치(9) 및 액체포이즌 제어장치(16)가 설치된다. 가압수형 원자로의 부하추종제어장치는 상술한 실시예와 동일 기능을 갖는 부하추종제어장치(24), 액체포이즌 제거제어장치(29A), d 주입제어장치(29B), 일정부하추종제어장치(30), 원자로 출력 통괄제어장치(33) 및 조작반(34)을 갖고 있다.

본 실시예의 부하추종운전의 제어는 특별히 설명하지 않지만, 상술한 실시예와 마찬가지로 행할 수 있다.

## (57) 청구의 범위

### 청구항 1

원자로 출력의 조조정용으로서 제어봉으로 구성되는 제1제어수단과, 원자로 출력의 미조정용으로서 액체포이즌 농도 조절수단으로 구성되는 제2제어수단을 갖는 원자로의 출력을 종전의 부하변경계획과는 상이하며, 소정 기간내의 부하변경이 주기적으로 반복되는 일정한 부하변경계획에 의거하여 예측되는 반응도에 따라서 제어하는 원자로의 운전제어방법에 있어서, 상기 부하변경계획의 제1사이클에 있어서의 상기 제1제어수단의 조작에 의해 투입된 제1반응도를 구하고, 상기 제1사이클에 있어서의 상기 제2제어수단의 조작에 의해 투입된 제2반응도를 구하고, 상기 제1사이클에 연속하는 부하변경계획의 제2사이클에 있어서 상기 제2제어수단의 조작에 의해 설정될 제3반응도를 제1 및 제2반응도에 따라서 예측하며, 상기 제3

반응도를 상기 제1사이클기간에 예측하여 그 값을 기억하고, 상기 제2사이클동안 상기 제1사이클기간에 기억된 제3반응도에 따라서 상기 제2사이클에 있어서의 상기 제2제어수단을 작동시킴으로써 원자로 출력을 제어하는 것을 특징으로 하는 원자로의 운전제어방법.

## 청구항 2

제1항에 있어서, 상기 제2사이클기간을 복수의 제어시간구분으로 분할하고, 상기 각 제어시간구분마다에 있어서의 상기 제3반응도를 구하여, 그 값을 기억하는 것을 특징으로 하는 원자로의 운전제어방법.

## 청구항 3

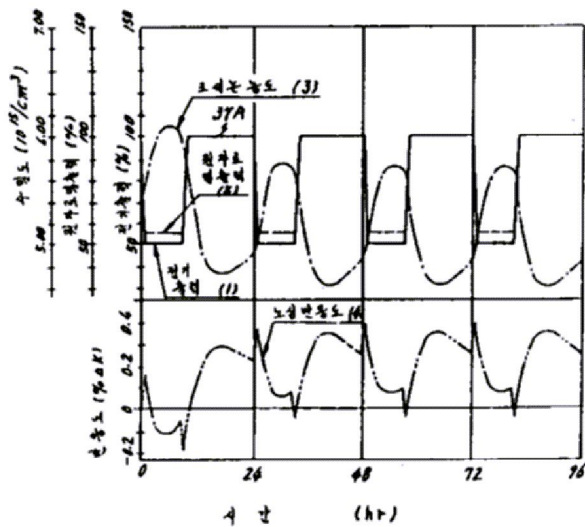
제1항에 있어서, 상기 제2사이클기간의 반응도의 변화가 상기 제1사이클기간의 반응도의 변화와 같아졌을 때 상기 제2사이클기간에 있어서의 원자로 출력을 구해진 상기 제3반응도에 따라서, 상기 제2제어수단을 조작함으로써 제어하여, 그후 계속하는 것을 특징으로 하는 원자로의 운전제어방법.

## 청구항 4

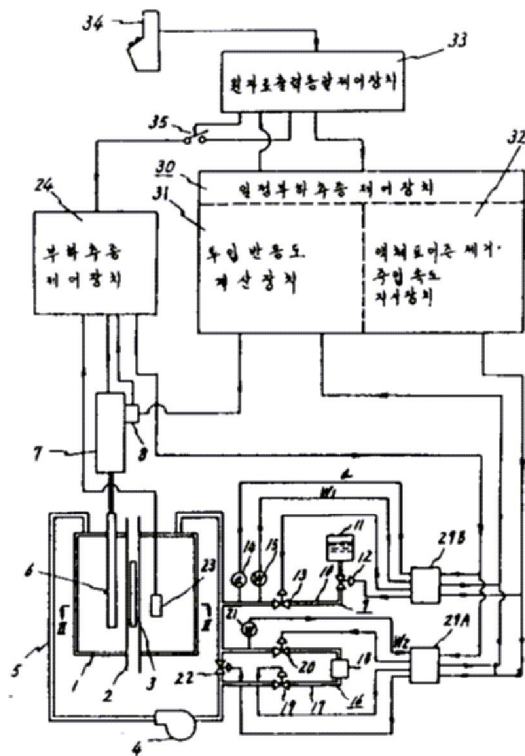
제3항에 있어서, 상기 제2사이클기간의 반응도의 변화가 상기 제1사이클기간의 반응도의 변화와 같아질 때까지 상기 제2사이클기간에 있어서의 원자로 출력을 상기 부하변경계획 및 노심동적특성해석데이터를 근거로 반응도의 변화율에 따라서 제어하는 것을 특징으로 하는 원자로의 운전제어방법.

## 도면

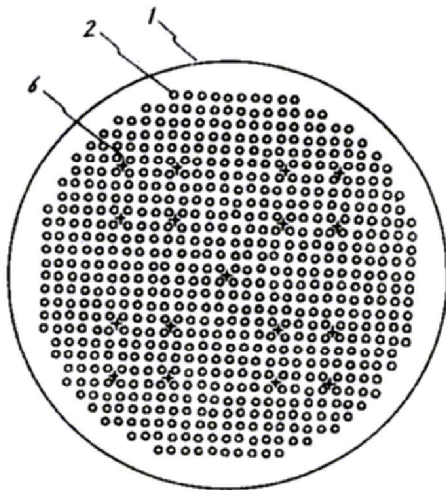
도면1



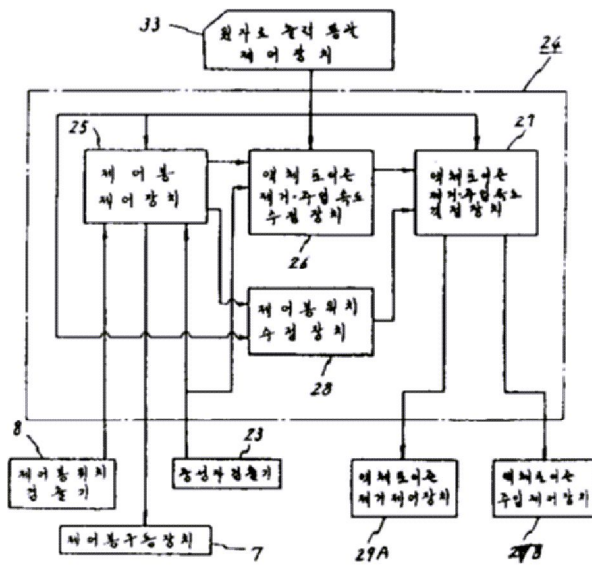
도면2



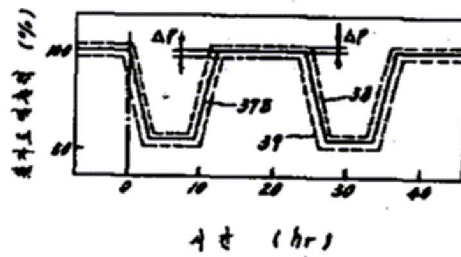
도면3



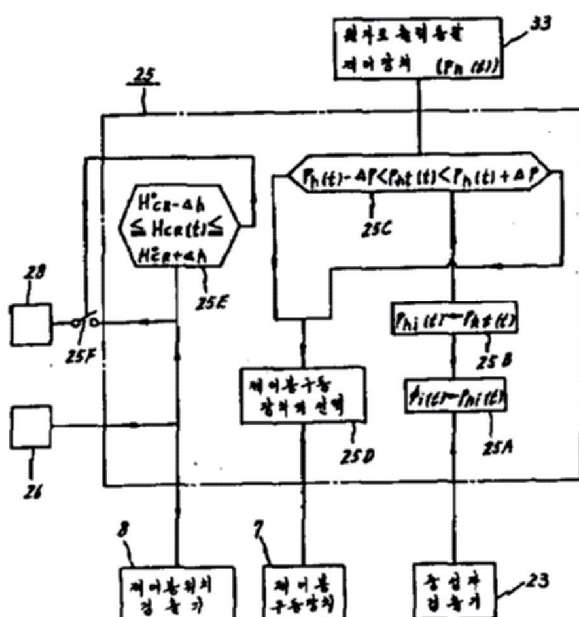
도면4



도면5

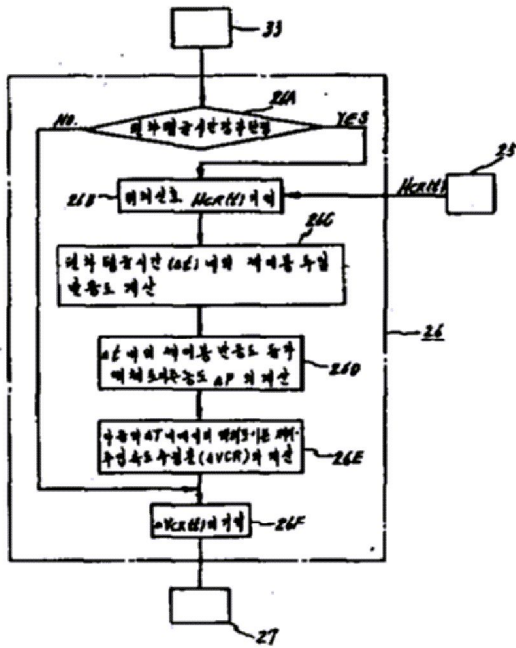


도면6

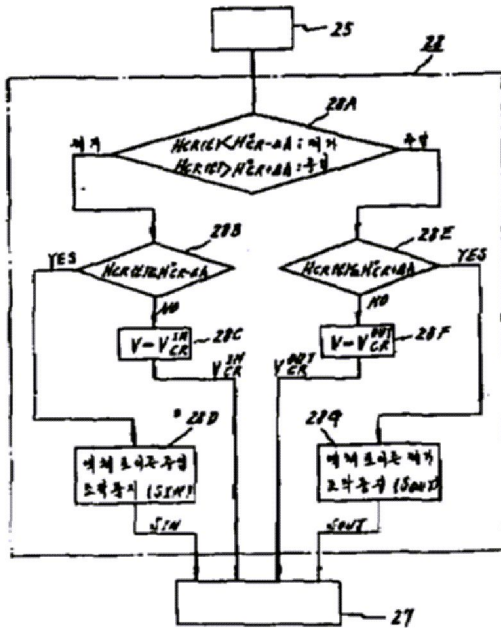




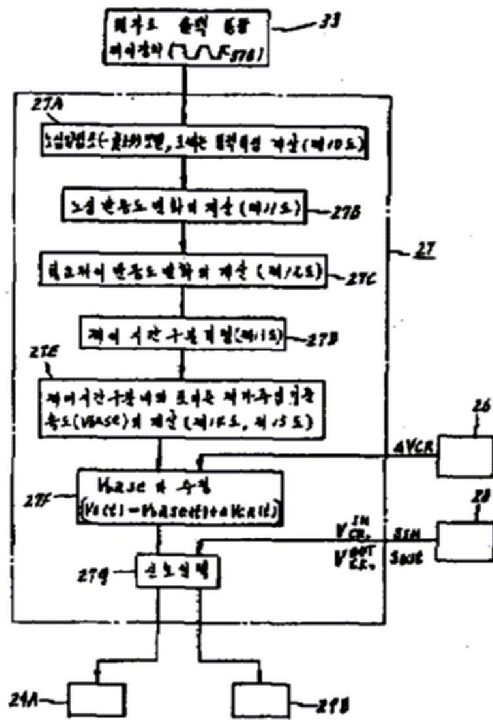
도면7



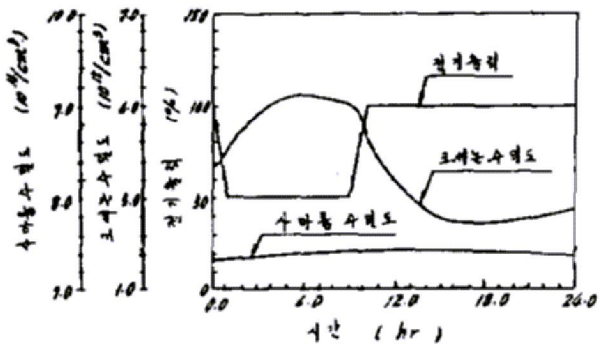
도면8



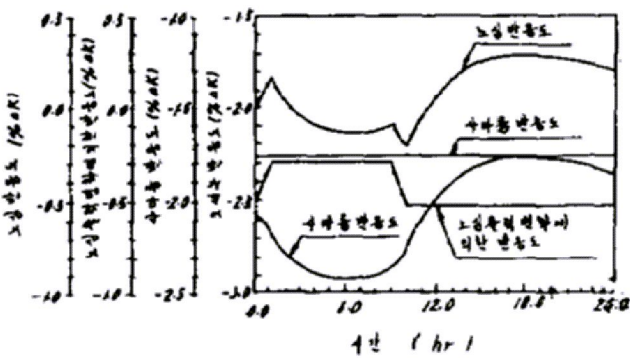
도면9



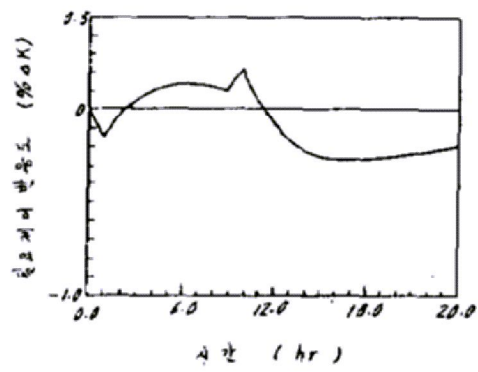
도면10



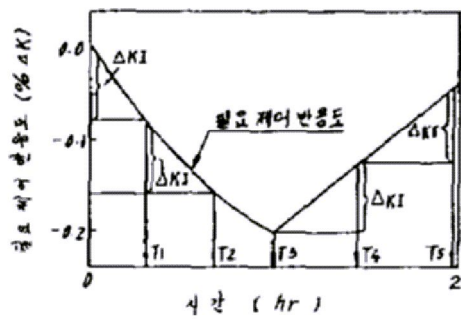
도면11



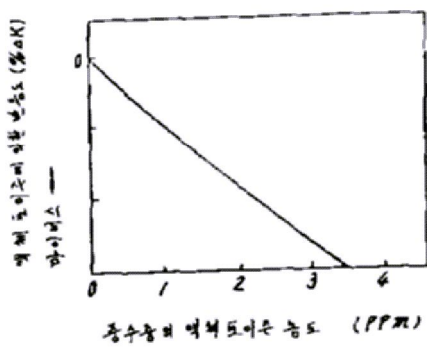
도면12



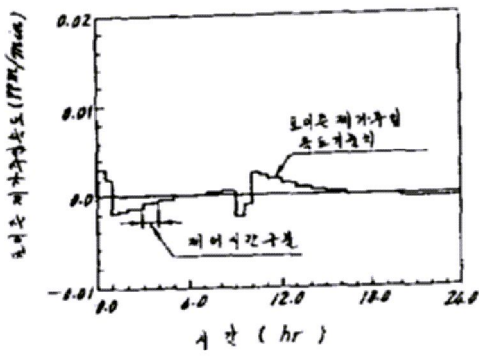
도면13



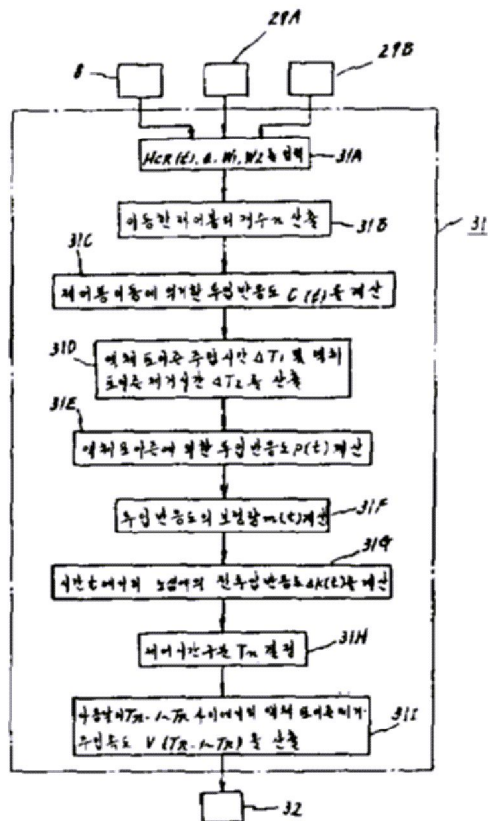
도면14



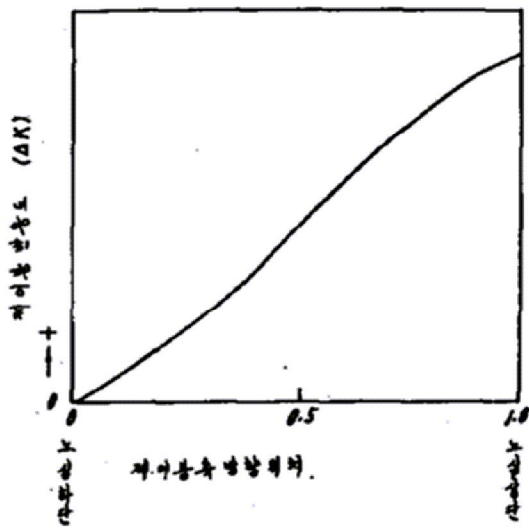
도면 15



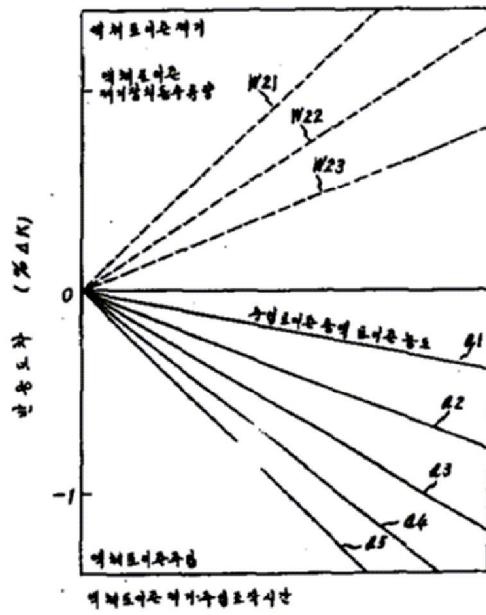
도면 16



도면17

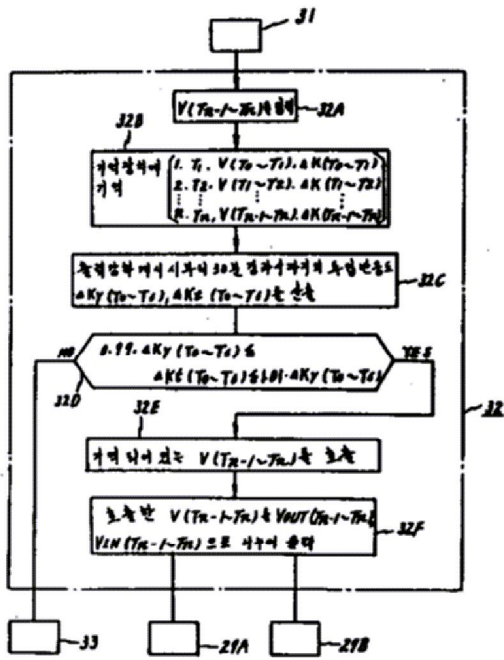


도면18





도면 19



도면 20

