

고리 원자력 발전소 개요—Ⅳ

—古里 原子力 發電所 概要—

최 장 등

한국전력주식회사 원자력실

(1970.5.20 접수)

Ⅵ. 공학적 안전 설비(Engineered Safeguards)

1. 개 요

UO₂ Ceramic Fuel Pellet 자체가 핵 분열 생성물질의 유효능력을 갖고 있으며 내마모성 Zircaloy-4로 피복되어 있고 감속재의 부온도계수(負溫度係數), U²³⁸의 Doppler 효과로 인한 반응도의 Negative Feedback 등 효과가 있기 때문에 저 농축우라늄을 사용하는 경수로는 원자로 고유의 안전성을 갖고 있다. 또한 이들 고유의 안전요소가 없다고 하더라도 핵 분열생성물질은 1차 냉각 계통의 폐회로내에 유보시키도록 되어 있어 열로 피복을 핵분열생성물질의 외부 유출을 막는 1차 장벽이라고 한다면 1차 냉각 계통의 폐회로는 2차적인 장벽을 이룬다. 상기 고유의 안전성에 더하여 소위 Applied Safety가 있으므로 정상운전시 충분한 안전성이 유지된다. 그러나 만일의 최대 가상 사고가 발생한다고 가상할 경우 핵분열생성물질의 외부유출을 제어하며 방사성 피해를 최소로 함과 동시에 노심 용융을 방지하기 위한 공학적 안전 설비가 필요하게 된다. 따라서 본 안전설비는 정상 운전시에는 실질적인 역할을 할 필요가 없는 일종의 Standby 설비로서 그 설계 및 운전상 주요 목적은 사고 발생시 핵분열생성 물질의 제어에 있다.

가압수형 원자로의 설계에 현재 적용되고 있는 안전설비 공통적인 설계기준(Design Basis)은 다음과 같다.

가. 노심설계 : 1차계통의 Pressure Boundary와 이들 보호계통에 의한 고유의 안전성을 Backup하도록 설계한다. 노심과 1차 냉각계통의 설계, 제작, 시험 및 점검 그리고 노심 및 1차냉각계통의 보호제

통으로 인하여 원자로는 여하한 조건에서도 안전히 그리고 신뢰성 있게 운전할 수 있도록 설계한다. 그러나 별도의 안전설비를 구비하여 모든 규모의 배관 2단 파열사고(Double Ended Break 혹은 Circumferential Rupture) 발생시에도 노심 용융을 방지하고 핵분열생성물질의 방출을 제한 하도록 한다.

나. 신뢰도 및 시험 : 공중의 건강과 안전을 해치지 않기 위하여 필요한 기능상의 신뢰도를 계속 유지하면서 시험을 행할수 있도록 설계한다.

다. 성능 : 본 안전설비 구동용 외부 전원 단절과 동시에 동 안전설비 중 구동중에 있던 어느 하나의 Component가 동작 불가능하게 될때에도 해 안전설비 전체로서는 충분한 성능을 발휘할수 있도록 설계한다.

라. Component Capability : 필요한 안전설비 기능은 냉각재일실사고의 영향을 받지 않도록 설계한다. 이 기준을 충족시키기 위하여 안전주입계통(Safety Injection System)과 격납용기분무계통(Containment Spray System) 중 가동부는 모두 격납용기 외부에 배치한다.

마. 사고악화방지 : 정상적인 노심냉각능력 상실로 인한 후속영향이 더욱 악화되지 않도록 보호조치를 취한다. 즉 이설계기준을 충족시키기 위하여 1차계통에 파열사고가 발생한 경우 원자로를 Sub-Critical에 유지시키도록 제어봉을 완전 삽입한 상태로 유지하며 봉산 용액을 주입시켜 부반응도를 가해준다.

바. 각 계통의 전용 : 원자로 설비중 어느 계통의 일부를 안전 설비로 전용하여도 공중의 건강과 안전에 위협을 초래할 우려가 없는 경우에 한하여 상기 계통이나 부분품의 일부를 안전설비로 전용할 수 있도록 설계한다.

이 기준의 일례를 잔열제거계통(RHRS: Residual

Heat Removal System)에서 볼수 있는 데 동 잔열 제거계통의 안전설비에로의 전용에 대해서는 후술 하겠다.

고리에 건설될 가압수형 원자력 발전소의 안전 설

비에는 원자로 격납설비, 격납용기 공기재순환 및 여과 계통, 안정주입 계통 및 격납용기 스프레이 계통 등이 있다. 상기 각 계통의 안전보호 기능과 보호 방법은 대체로 다음과 같이 요약할 수 있다.

계통 및 설비명	보호 방법	기능
안전주입계통(Safety Injection System)	붕산수 용액을 원자로 냉각 계통에 주입함.	<ul style="list-style-type: none"> ◎ 긴급 노심냉각으로 연료피복재의 용융을 방지 함. ◎ 핵 분열생성물질의 외부방출을 제한 함. ◎ 피복재와 냉각재의 작용을 제한 함.
원자로 격납설비 (Containment System)	잠재적인 누설 통로를 폐쇄함.	◎ 격납설비 외부로의 핵분열생성물질의 유출을 방지함.
격납용기 공기 재 순환 및 여과계통(Air Recirculation & Filter System)	격납용기내 공기중의 핵분열 생성물질의 농도를 감소시키고 분말과 Iodine Vapor 를 급속히 제거함.	◎ 격납설비 외부로의 핵분열 생성물질의 유출을 방지함.
격납용기 스프레이 계통(Containment Spray System)	격납용기내의 압력을 감소시킴.	◎ 격납용기 외부로의 핵분열 생성물질의 유출을 방지함.

2. 안전주입계통(Safety Injection System)

안전주입계통은 원자로의 냉각재 상실 사고 발생시에 원자로 내에 붕산수를 주입 시켜 연료의 과도한 온도 상승으로 인한 연료손상 및 연료피복재(Zircaloy-4)와 냉각재사이의 반응을 방지하는 기능을 가지고 있다.

안전 주입계통의 운전은 두가지의 운전양상으로 구분할 수 있다. 첫째는 붕산수 주입운전(Injection Phase)으로서 이것은 1차냉각계통의 파열사고 발생 직후 필요한 운전양상이다.

둘째는 재순환 운전(Recirculation Phase)으로서 이는 상기 주입운전이 끝난후 노심을 장시간에 걸쳐 냉각시키기 위하여 파열사고 지점으로 부터 유출된 붕산수를 노심내에 재순환시키는 운전양상이다. 주입운전중에는 독립된 2개의 계통에 의하여 붕산수가 냉각계통 폐회로의 저압측에 주입된다. 그 하나는 적극적인 방법으로 붕산수를 주입시키는 소위 Active Safety Injection 이며 나머지 하나는 소위 Passive Safety Injection 이다. 전자는 파열사고 발생후 냉각재 저압신호와 가압기 저수위 신호를 동시에 받아 잔열제거계통 펌프와 열교환기를 통하여 냉각계통 폐회로의 저압측에 붕산수를 주입시키는 방법이다. 이때 실제로 사고가 발생하였을때 안전주입계통의 신속한 동작을 보장하는 반면 여하한 위장사고에 대해

서는 안전주입계통의 운전을 피하도록 그 동작 신뢰도를 높이기 위하여 상기 각 신호는 각각 2 Out of 3 Independent Channel 을 통과됨 되어 있다.

다음에 Passive Accumulator Injection은 600Psig의 압력으로 Accumulator 내에 차 있는 붕산수가 냉각계통 폐회로의 저압측에 주입되는 방법이다. 1차 냉각 계통에 파열사고가 발생하여 냉각재계통 압력이 600Psig 이하로 하강하면 Check Valve에 평상시에 걸려있던 차동압력(냉각계통압력과 Accumulator 압력의 차) 방향이 바뀌므로 Check Valve 가 자동적으로 개방되어 Accumulator 내의 붕산수가 일차 냉각계통에 주입된다. 여기서 알수 있는 바와 같이 Accumulator의 동작은 아주 단순한 미캐니즘에 의존하고 있어서 특히 파열사고의 규모가 클 경우(냉각계통의 압력 강하가 아주 급격함) 전기적으로 구동되는 잔열 제거 계통의 펌프가 기동하여 연료장전 용수 저장 탱크(Refueling Water Storage Tank) 내의 붕산수를 일차냉각계통에 주입시키기전에 Accumulator 내의 붕산수를 주입시킴으로써 노심이 노출되거나 손상되는 것을 방지하게 된다.

이상에서 설명한 안전주입계통들은 모두 저압주입계통이며 이외에도 고압주입계통(High Head System)이 구비되는데 이것은 파열사고의 규모가 작을 경우(따라서 사고로 인한 냉각계통 압력 강하율이 낮음) 연료장전용수저장 탱크내의 붕산수를 냉각재계

통에 고압으로 주입시켜 노심 손상을 방지한다. 결과적으로 냉각재 배관의 2단파열 사고까지를 포함하는 대규모 파열사고가 일어났을 경우에는 상기 2개의 저압주입계통은 고압주입 계통의 도움을 받지 않고도 필요한 노심 냉각기능을 발휘하여 노심 손상을 방지할 수 있고 반대로 파열사고의 규모가 작을 경우 따라서 냉각재계통의 압력 강하율이 낮을 경우에는 고압주입계통의 도움을 받아 노심을 보호하게 된다.

재순환 운전(Recirculation Phase)은 장시간에 걸쳐서 노심을 냉각시키기 위한 운전으로서 통상 전술의 봉산주입운전에 뒤따르는 운전이다. 즉 파열점을

통하여 외부로 유출된 봉산을 함유한 냉각재는 격납 용기내의 Sump에 집결된다. 잔열제거계통 펌프가 상기 Sump로부터 Suction을 취하여 열교환기를 통과한 후 일차냉각계통에 재순환 시킨다. 또한 고압 주입계통 동작으로 인하여 연료장전용수 저장탱크내 봉산수 수위가 미리 정해진 수위 이하로 하강 하면 자동적으로 재순환운전이 시작된다. 이와 같이 주입 운전에서 재순환운전으로 전환되는 동안에도 고압 주입계통과 잔열제거계 저압주입계통이 계속 가동되어 냉각재계통에 봉산수를 주입하므로 재순환운전과 어느 정도의 중첩대를 이루게 된다. 그림 1은 안전 주입 계통도이며 표 1은 안전주입계통 주요설계제일

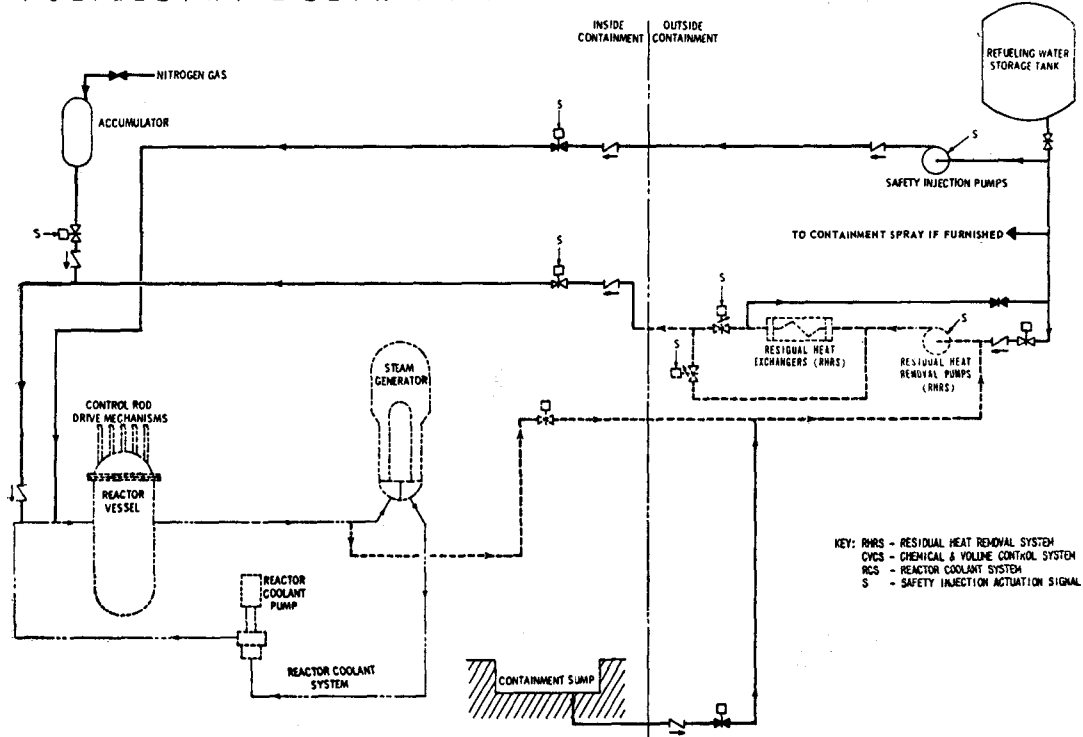


그림 1. Safety Injection System

표 1. SAFETY INJECTION SYSTEM 주요설계 PARAMETER

A. Safety Injection Pumps

Number	2
Type	Horizontal, centrifugal
Design pressure	1750 psig
Design temperature	300 °F
Operating temperature	50 to 100 °F
Minimum shutoff head	3,500 feet
Design flow rate, each	600 gpm
Design head	2,500 feet

B. Accumulators

Number	2
Capacity (each)	2,000 cu. ft.
Design pressure	800 psia
Design temperature	300 °F
Material	Austenitic stainless steel

C. Piping

Austenitic stainless steel

D. Valves

Austenitic stainless steel

을 표시한다.

3. 원자로 격납설비 (Reactor Containment)

격납설비는 철강계의 격납용기와 이를 둘러싸고 있는 Reinforced 콘크리트 차폐구조물로 구성된다. 격납용기내에는 원자로, 원자로냉각설비 및 연료취급기기의 일부를 포함하는 보조 설비들이 들어 있다. 또한 본설비에는 냉각, 가열, 조명 및 환기장치가 되어있다. 또한 가상 냉각재 상실사고 발생후 격납설비내의 압력, 온도 및 공기오염도등을 허용가능한 수준까지 감소시키기 위한 격납설비 스프레이 제동과 사고 후의 냉각 설비등도 격납설비 구조물내에 수용된다.

가. 격납용기

격납용기는 반구형 돔(Hemispherical Dome)과 Torispherical Bottom 을 가진 하나의 원주형 용기로서 대체적인 준법은 다음과 같다.

원주형용기 높이	136 피트
원주형용기 내경	115 피트

철강판 두께 :

반구형 돔	0.75 인치
원주형 부분	1.5 인치
용기 저부	1.5인치

나. Air Lock 와 기기반입용 헛취(Equipment Hatch)

격납설비에는 2개의 Air Lock 와 기기반입용 헛취를 갖고 있어 이 세계의 경로를 통하여 격납용기내에 사람이 접근할 수 있도록 되어있다.

2개의 Air Lock 중 하나는 정상시 사람이 출입하기 위한 것이고 나머지 하나는 긴급시에 한하여 격납용기로 부터 탈출하는데 사용되는 비상용이다. Air Lock 는 이중 Gasket 로 밀폐 되어 있으며 기밀(Leak Tight)을 시험하기 위하여 양 밀폐(Seal) 사이의 공간을 가압할 수 있는 조치가 마련되어 있다. Air Lock 의 안쪽문과 바깥쪽문은 공히 격납용기 내부로만 열리도록 되어 있으므로 격납용기내에 높은

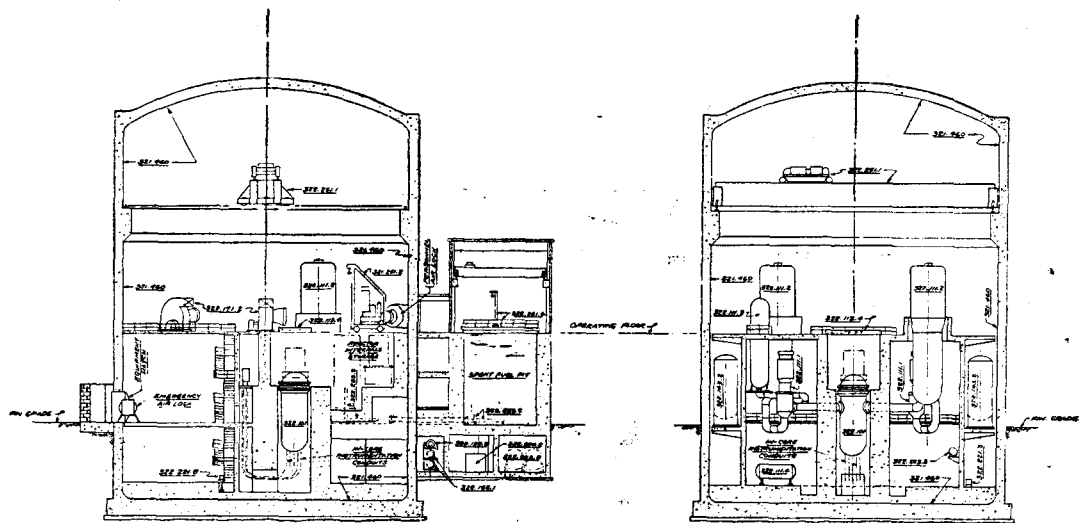


그림 2. Reactor Containment

압력이 발생하더라도 기밀이 유지된다. 또한 보안 조치로서 두개의 Air Lock는 동시에 열리지 못하도록 상호 연계(Interlock) 되어 있으며 그 개폐상태를 원자로 제어실에서 알 수 있도록 표시등과 경보 장치가 마련되어 있다.

기기 반입용 헛취는 원자로용기 Upper Head 패쇄용 원형 O-Ring을 반입하기에 충분한 크기를 갖도록 설계한다. 기타 Gasket Seal 등은 상기 Air Lock와 동일 하다.

다. Penetration

격납용기 내부와 연결되는 모든 파이프 및 케-블은 Penetration을 통하여 격납용기내에 들어가는때 이 때 Penetration (관통부)에서의 개스나 증기의 외부 누설율은 설계압력에서 24시간 동안에 격납설비내 공기량(부피)의 0.1%을 초과 하지 아니하도록 설계한다. 그림 2는 격납용기 단면도이다.

4. 격납설비 분무 계통(Containment Spray System)

격납설비 분무 계통은 냉각재 상실 사고가 발생할 경우 격납용기내의 공기를 냉각 시키고 Iodine을 제거하는 역할을 한다. 즉 냉각재 상실사고 또는 증기관이 파열되면 격납용기내에 다량의 수증기가 새어나오게 될지도 모르며 이로 인하여 격납용기내 압력과 온도가 상승하게 되는데 이 것을 강하시키기 위

하여 두개의((100% 용량 2대) Containment Spray System Header가 있어서 격납용기내의 열과 Iodine을 흡수 시킨다. Containment Spray System은 두개의 펌프(100%×2), 화공첨가제 저장 탱크, 2개의 Spray Header 및 분무용 헤더(Spray Header)와 기타 필요한 배관 및 밸브로 구성된다. Spray System의 중요한 부분은 전부 이중 급수계통(Water Supply System)으로 구성되며 두개의 분무용 헤더(100%×2) 통하여 격납용기 상부로부터 물을 살포한다.

본 계통은 두개의 2 of 3 격납용기고압동시신호에 의해서 기동되며 연료장전용수저장 탱크로 부터 Suction을 취한다.

연료피복재 손상이 생겼을 때는 다량의 수증기 이외에도 격납용기대기중에는 노심으로부터 방출된 휘발성 Iodine이 다소 존재하게 된다. 이 휘발성 Iodine 제거 목적으로 NaOH를 화공 첨가제로 사용하는때 이 첨가제가 격납용기에 분무되었을때 Iodine과 화학적으로 작용하므로 외부로의 Iodine 누설을 방지하게 된다. 연료장전수 저장탱크내의 봉산수 수위가 내려감에 따라 재순환 운전이 들어갈때 격납용기내 Sump(격납용기 분무계통과 안전주입계통에 의하여 주입된 봉산수 만큼이 집결해 있음)로부터 Suction을 취하여 잔열제거계통의 열 교환기에서 냉각된 후 격납용기내에 다시 분무된다. 표 2는 격납설비 분무 계통 주요 설계 제원을 표시한다.

표 2. CONTAINMENT SPRAY SYSTEM 주요설계 PARAMETER

A. Spray Additive (Chemical Injection Tank)

Number	1
Type	Horizontal
Volume, tank, gal.	8,000
fluid, gal.	7,900
Design pressure, psig	300
Design temperature, °F	300
Fluid	Sodium Hydroxide solution
Material	Carbon steel clad with type 304 austenitic stainless steel

B. Containment Spray Pumps

Number	2
Type	Horizontal centrifugal
Design pressure, psig	300
Design temperature, °F	300
Operating temperature, °F	70-285
Design flow rate, gpm	2,500
Total developed head, ft	450
Material	Type 304 austenitic stainless steel

5. 격납용기내 공기냉각 및 여과 설비(Containment Air Recirculation Cooling & Filtration System)

격납용기내에는 운전중 기기에서 발생하는 열을 제거하기 위하여 내대의 공기 순환 냉각용 통풍기가 있는데 비상시에는 그중 두대로 격납용기내의 압력을 유지하기와 동시에 열도 제거한다. 또한 고성능 여과장치가 통풍입구측에 설치 되어 있어 공기를 순환할 때 공기중의 방사성 입자도 제거하게 된다.

VIII. 핵계장 및 제어(Nuclear Instrumentation and Control)

1. 개요

계장 및 제어계통은 중앙 집중식으로 되는데 그 구성 요소는 다음과 같다.

- 가. 원자로 제어 및 보호계통
 - a. 원자로 제어
 - b. Steam Dump 제어
 - c. 제어봉 정지 Group (Shutdown Group)의 제어
 - d. Part length 제어봉의 제어
 - e. 연계 (Interlocks)
 - f. 원자로 보호
 - g. 제어봉 구동 Programmer
 - h. 제어봉군(Control Group)—제어봉 구동 계통
- 나. 핵 계장 계통
- 다. Process 계측 및 제어
- 라. In-Core Instrumentation

다음에 상기 각 요소에 대하여 설명하기로 한다.

2. 원자로 제어 및 보호 계통

원자로의 전반적인 반응도는 화학 Shim(Chemical Shim)과 제어봉으로 제어한다. 즉 연료의 연소도(Burnup) 또는 Xe Poison 을 보상하기 위한 장시간에 공한 반응도 제어는 냉각재내 붕소 함량조절에 의한 소위 Chemical Shim 제어 방식에 의존하며 출력변화나 원자로 Trip 등에 따르는 단시간의 반응도 제어는 제어봉 조절에 의한다.

출력 운전중에는 원자로 제어 및 보호계통이 제어봉을 자동제어 한다. 여기에 사용되는 입력 신호는 증성자속, 냉각재평균온도, 압력, 유량, 제어봉위치 및 열출력등이다. 화학 및 체적 제어는 붕산 용액의 가감량을 변화시킴으로써 반응도의 장기제어를 위한 2차적인 원자로 제어제로서의 역할을 하게 된다. 또

한 본 계통은 Xe Poison 제한이 허용하는 범위에서 출력 운전중 원자로를 Trip 시키지 않고서도 원자로로 하여금 발전기의 단계적(Step 狀) 또는 연속적(Ramp 狀) 부하변동을 따를수 있도록 하며, Steam Dump 에 의하여 원자로의 출력조건에 관계없이(원자로 출력이 전출력이진 아니건 관계없이) 원자로를 Trip 시키지 않고도 발전기의 순간적인 부하 감소를 수용할 수 있게 한다.

가. 원자로 제어(Reactor Control)

정상 출력 운전중 원자로 제어계통의 기본 역할은 주어진 부하에 대하여 냉각재 온도를 미리 계획된 값에 유지 시키는데 있다. 또한 본 계통은 출력동요가 생기면 원자로 계통의 과도 현상을 출력동요에 대하여 계획된 온도치 근방에 설치된 제한치에 억제 시켜 준다.

냉각재 Loop 마다 열전대를 사용한 저항 온도계가 한쌍씩 있어서 냉각재 Loop 의 평균온도를 측정한다. 즉 냉각재 Loop 의 Hot Leg 와 Cold Leg 에 있는 저항체(Resistance)를 연결한 Bridge회로에 의해서 냉각재 평균 온도에 비례하는 Bridge회로 출력 신호를 얻게 된다. 한편 발전소 출력에 비례하는 신호가 나와 Reference Temperature 를 설정하게 되며 controller 에서 측정된 냉각재 평균온도와 상기 Reference Temperature 가 비교된다. Controller 는 고정된 제어봉군(Control Group)을 움직여 출력을 변동시키며 냉각재 온도를 적정치에 유지시킨다. 각 Control Group 내의 제어봉은 비례속도제어기(Proportional Speed Control)에 의해서 순차적으로 동작되므로 전 연료수명기간에 공한 정상운전시 미세한 온도제어가 가능하게 된다. 비교적 큰 부하 변동을 흡수하기 위해서 반응도를 급속히 줄일 필요가 있을 때는 비례속도 제어기에 의해서 Control Group 이 보다 빠른 속도로 동작하므로 사실상 한 Unit 로 움직인다. 보다 크고 급속한 부하변동에 대해서는 상기 냉각재 평균온도 신호외에 Controller 의 응답(Response)을 좋게 하기 위하여 압력신호, 증성자속 신호, 및 터빈 출력신호 등이 추가로 사용된다.

나. 증기 Dump 제어(Steam Dump Control)

증기 Dump 제어계통은 큰 Step 상 부하 격감시나 원자로 Trip 시 원자로 냉각재 계통내에 축적된 열을 제거하는 역할을 한다. 계획된 냉각재평균온도에 있어서는 전출력시 평균 온도가 증기 발생기의 안전변의 설정 압력에 대응하는 포화 온도보다 상당히 높으므로 큰 Step 상 부하격감시나 원자로 Trip 시에 안전변의 동작을 피할만큼 빠른 속도로 냉각재 계통

의 열을 제거하기 위하여 터빈을 Bypass 하여 복수기에 증기를 Dump 시킨다. 증기 Dump 계통은 노냉각재 평균온도와 증기 압력 신호에 의하여 동작되며 발전소 출력과 Interlock 되어있어 종합적인 제어 신뢰도를 높이고 있다.

다. 정지 Group (Shutdown Group)의 제어

제어봉 정지 Group(Shutdown Group)은 충분한 안전여유를 갖고 원자로를 정지시킬 수 있으며 모든 운전 상태에 대해서 적정 정지여유(Shutdown Margin)를 확보하도록 Chemical Shim 과 Control Group 의 조정과의 제휴하에 사용된다. 제어봉 Shutdown Group 은 원자로 Trip 시 이외에는 모두 수동으로 조작되며 일정속도로 이동하는 정지 Group 에 속하는 제어봉들은 출력운전중에 완전히 인출한 상태에서 두며 기동시에는 우선 인출한다. 임계(Criticality)는 언제나 정지 Group 을 완전 인출한 후에 다음에 설명하는 제어군(Control Group)을 조절하여 달성한다.

라. Part Length 제어봉의 제어

Part Length 제어봉은 노심 축방향 출력분포 조절에 신속성을 주고 축방향 Xe 진동을 억제하는데 사용된다. 이들은 하부 3피트 길이에 중성자 흡수체를 갖고 있는 RCC (Rod Cluster Control) 제어봉으로서 노심 상하부의 이온상 (Ion Chamber) 출력 신호를 근거로 하여 미리 설정된 노심 상하부출력간의 관계를 유지하기 위하여 가끔 수동조작에 의하여 동작시킨다. Part Length 제어봉 구동용 전원용으로서 상기 정지용 제어봉 구동전원과 독립된 전원을 사용하며 원자로가 Trip 해도 Part Length 제어봉은 Trip 되지 아니한다.

마. 연계(Interlocks)

자동 제어 Group 은 미리 정해진 일정 부분부하 이하에서는 자동 제어가 없도록 터빈 출력과 연계(Interlock)되어 있다. 또한 수동 및 자동제어제는 냉각재 온도, 중성자속 및 제어봉 삽입 지시등과 연계 되어 과출력 상태에 도달 하는 것을 방지하게 되어 있다.

바. 원자로 보호(Reactor Protection)

원자로 보호계통은 각 계장 설비로부터 신호를 받는데 불안정한 운전상태가 발생할 경우 운전 상태의 불안전도에 따라 경보를 발하던가, 제어봉구동을 방지하거나 또는 출력을 감소시키거나 원자로 스위치를 Trip 개방한다. 동 보호 계통의 각 Trip 신호는 다음과 같다.

a. 원자로 수동 Trip: 필요시 운전원이 즉각적으로

로 사용할 수 있도록 수동 Trip 용 Button 이 구비된다.

b. 저출력 중성자속: 원자로 정지혹은 기동중 원자로 보호를 위해서 Source Range 및 Intermediate Range Trip 장치가 구비된다.

c. 고중성자속(High Neutron Flux): 고중성자속 Trip 회로의 Set Point 는 기동중에는 비교적 낮은 값에 두고 출력운전중에는 전출력 이상에 설정한다.

d. 안전주입 기동: 안전주입계통(Safety Injection System) 기동과 동시에 원자로 Trip 신호가 발생된다.

e. 과출력-과온: 연료나 피복재의 과도한 온도상승 또는 과도한 Bulk Boiling 현상을 초래할지도 모르는 노냉각재 조건을 방지하기 위하여 공정제어자료로부터 도출되는 신호에 의하여 원자로가 Trip 하도록 되어 있다.

이 원자로 Trip 설정치는 원자로 냉각재 온도 측정치를 이용하여 계속적으로 계산하게 된다. 비정상적인 출력분포가 일어난 경우에는 노심 핵계장설비에 Reset 장치가 있어서 Trip 설정점을 내릴 수 있다.

f. 고정 고압(Fixed High Pressure): 가압기 압력이 높아지면 원자로를 Trip 시키게 되는데 그 목적은 원자로 냉각재 계통을 과압으로부터 보호하기 위한 것이다.

g. 고정 저압 Trip(Fixed Low Pressure Trip): 가압기 압력이 낮아지면 원자로를 Trip 시킨다. 이 Trip은 저압범위에서 상기 e항의 과출력-과온 Trip 을 보완한다.

h. 고정 과압기 고수위: 이 Trip 장치는 고정 고압 Trip 의 Backup 으로 마련되는 것이다.

i. 냉각재 유량상실(Loss of Coolant Flow): 원자로가 미리 설정된 수준 이상의 출력에서 운전하고 있을때 어느 냉각재 Loop 에라도 냉각재 유량이 낮아지면 원자로를 Trip 시키게 된다. 냉각재 펌프 구동전원이 상실 될 때도 유사한 Trip 신호에 의해서 원자로가 Trip 된다.

j. 터빈 발전기 Trip: 터빈 발전기가 Trip 되면 원자로가 Trip 되어 냉각재 온도나 압력이 미리 설정된 값 이상으로 상승 하는 것을 방지하게 된다.

k. 증기발생기 저수위 Trip: 증기발생기 저수위 Trip 은 증기발생기를 증기발생기 재고수량 상실로부터 보호하기 위한 것으로서 급수류량, 증기류량 및 증기 발생기수위 측정치로부터 Trip 신호를 받는다.

원자로 Trip 신호들은 기동중 필요한 조작과 제어봉구동을 허용하고, 원자로가 출력범위의 운전 에 들

어가면 저출력과 중간출력 영역에서의 보호기능을 제거할 수 있도록 중성자속과 증기출력의 측정치와 상호 연계(Interlock)되어있다. 모든 원자로 Trip 신호들은 독립된 배선과 논리회로(Logic Network)를 통하여 두개의 원자로 Trip 용 차단기를 다 Trip 시키게 된다.

모든 보호 Channel은 최소한 이중(One Out of Two Trip Mode)으로 되어 있으며, 출력운전중 보호를 위해서 냉각재 펌프 차단기와 같이 Trip 신호가 Backup 용으로 쓰이는 경우를 제외하고는 언제나 최소한 삼중(Two Out of Three Trip Mode)으로 된다. Trip Sensor와 Channel은 완전히 분리되며 (Sensor와 Sensor 간, Channel과 Channel 간의 분리를 의미함) 또한 각각 동일한 설비를 중복으로 갖게되어 있다. 최종적으로 원자로 Trip 용 차단기는 동시신호에 의해서 동작하게끔 되어 있다. 이와 같이 배치돼 있기 때문에 출력운전중 원자로를 Trip 시키거나 또는 Trip 능력을 저하시키지 않고도 어느 Channel이라도 점검, 보수 및 시험할수 있다.

사. 제어봉 구동 프로그램머(Rod Drive Programmer)

트랜지스터 회로로된 제어봉 구동 프로그램머(Rod Drive Programmer)가 있어 제어봉 구동 기구를 동작시키는 전원회로(역시 Solid State 회로임)의 출력을 제어 하도록 가변 주파 맥동을 Sequence에 따라 발생한다. 따라서 제어군에 속하는 제어봉 Cluster는 Sequence에 따라 움직이며 제어봉 Cluster의 이동 Sequence는 가역적(Reversible) 이어서 인출 Sequence는 삽입 Sequence의 정 반대이다. 또한 그 Sequencing Speed는 노제어계로 부터 받는 제어 신호에 비례하므로 노제어계로 부터의 Demand Signal에 비례하는 제어군 속도제어를 할 수 있게 된다.

Solid State로 된 제어봉구동용 전원회로는 Programmer로부터 Sequence 신호를 받아 제어봉 구동 기구의 코일을 여자(勵磁)시킨다. Programmer는 또한 이동할 제어봉을 선택하고 부하조건에 일치하도록 하기 위하여 반응도의 변화율에 대비하는 역할을 한다. 제어봉 구동 기구의 코일 여자용 전원과 직병렬로 연결된 4개의 Trip 용 차단기중 2개는 발전소 가동중 원자로 보호계통을 시험할 수 있도록 Bypass 용으로 사용된다.

아. 제어군 제어봉 구동계통

제어봉 구류의 위치는 한 구류에 속하는 제어봉들이 Magnetic Jack에 의해서 인출된 Step 수로서 표

시된다. 이들 Step 수는 Programmer로부터 맥동신호를 받는 가감계수계로 계수한다. 즉 한 제어봉 Cluster에 속하는 제어봉의 각 상향 Step 하나에 대하여 기왕의 위치 지시치에 하나를 더하도록 한 개의 맥동을 받는다. 반대로 하향 Step(또는 삽입 Step)에 대해서는 기왕의 위치지시치에서 하나를 빼도록 한개의 맥동을 받는다. 이 외에도 Pressure Housing 외부에 설치돼 있는 Stepping Mechanism 상부 코일로부터 모든 제어봉에 대한 Analog 신호를 얻도록 되어 있다.

3. 핵 계장 계통

핵 계장 계통은 Source Range로부터 전출력의 120%의 범위에 공한 원자로 출력을 감시하게 된다. 즉 원자로 용기부근의 일차 차폐내의 핵 계장용 Well에 취부되는 열중성자속 검출기에 의해서 상가감시 범위의 원자로 출력을 감시하게 되는 것이다. 이 계통은 원자로 운전 및 보호를 위하여 노출력지시, 제어 및 경보등을 발생하도록 되어있다. 아래에서 핵 계장 계통을 검출기, Source Range, Intermediate Range 및 Power Range로 구분 설명한다.

가. Source Range

핵 계장 계통용 검출기로서는 8개의 이온상(Ion Chamber)가 사용 되는데 이중 2개가 비례계수계(Proportional Counter)로서 Source Range Channel에 사용된다. 이들은 원자로심 수평단면의 양쪽 평탄부, 노심 높이의 중간 위치에 있는 핵 계장용 수직 Well 내에 설치된다. 일차 차폐부근에서 중성자속이 측정되면 검출기내에서 맥류(Current Pulse)가 발생하게 된다. 이들 맥류는 트랜지스타로 된 Pre-Amplifier를 통하여 원자로 제어실에 있는 증폭기와 Discriminator에 송신된다. 이들 채널은 Source Range의 중성자속 준위를 지시하며 원자로 제어 및 보호계통에 원자로 Trip 신호와 경보 신호를 제공한다. 이들은 또한 원자로 정지시에 반응도의 이상증가에 대하여 경보를 발생하는데도 사용된다. 원자로 초기기동과정에는 하나의 가청 계수율 신호가 사용된다.

나. 중간 영역(Intermediate Range)

중간 영역의 중성자속 감시를 위해서 2개의 보상형 이온상(Compensated Ion Chamber)이 사용되는데 이온상에서 발생하는 직류가 원자로 제어실에 있는 중간 영역용 증폭기(Intemediate Range Amplifier)에 송신된다. 이 중간 영역채널은 중간 영역의 중성자속 준위를 지시하는 이외에도 고중성자속

경보 신호와 Trip 신호를 발생하며 중성자속이 중간 영역에 도달하면 Source Range 용검출기로 부터 오는 고 전압을 자동차단하게 된다.

다. 출력영역 (Power Range)

출력 영역 채널 (Power Range Channel) 용으로서 원자로심 높이와 대체로 비슷한 길이를 가진 4개의 보상형 이온상이 사용된다. 이들 이온상의 내부 전극은 이동분 되어 있으므로 실질적으로는 원자로심 높이의 약 반 정도의 길이를 갖고 있는 8개의 비보상형 이온상 (Uncompensated Ion Chamber) 를 갖고 있는 셈이 된다. 이들 보상형 이온상들은 원자로심 수평단면의 네 모퉁이에 근접한 수직 Well 안에 설치된다.

출력 영역 측정에는 세가지가 있으며 각 측정은 아래에 열거한 네개의 개별 전류를 사용하여 측정하게 된다.

- a. 이온상 하반부(비보상형 이온상)로 부터 직접 오는 네개의 전류 신호
- b. 이온상 상반부(비보상형 이온상)로 부터 직접 오는 네개의 전류 신호.
- c. 상기 a 및 b의 합계전류 또는 평균 전류신호 네개.

하나의 Microammeter 가 상기 a 및 b 네개의 전류를 각각 측정 하며 합계전류 또는 평균 전류가 증폭기와 Bistable Trip 회로에 인가된다. 각 증폭기에는 원자로 정격 전출력에 대응하는 직류 전류에 조정하기 위한 Gain 및 Bias 제어장치가 있다. 네개의

증폭기 각각으로 부터 주제어반에 증폭전류가 공급되어 지시 및 평균온도제어에 사용된다. 상기 c항의 각 평균전류회로에 있는 한 Bistable 은 제어봉 고속 정지 신호를 발하며 이는 과출력상태로의 접근을 지시하는 것이다. 나머지 Bistable 은 저출력 및 과출력 운전중 원자로 Trip 신호를 제어봉회로차단기에 보낸다.

기타 보조계통으로서 주제어반에는 운전원이 감시할 수 있는 기록계가 구비되는데 선택 Switch 를 사용하여 Source Range 중간영역 및 출력 영역의 신호를 기록 할수 있도록 되어 있다.

4. Process 계측 및 제어

1차계통과 보조계통을 위하여 Process 계측 및 제어 설비가 공급되는데 원자로 냉각재 계통의 Process 계측설비의 일부는 원자로 제어 및 보호 계통에 제어 및 보호 신호를 공급한다. 봉산수의 가감 방법에 대해서는 화학 및 체적 제어 계통(전호 화학 및 체적 제어 계통 참조)에서 상술 했다. 증기 발생기 수위 제어를 위해서는 표준형 3인자 급수 제어 계통 (Standard 3-Element Feedwater Control System) 이 사용되며 이는 재래식 화력에서의 급수 제어 방식과 동일하다. 급수 제어계통의 제어에는 증기발생기 수위, 증기 압력, 급수류량 (Feedwater Flow) 및 증기류량 (Steam Flow) 외에 급수 류량제어밸브 (Feedwater Flow Control Valve) 이 포함 된다.

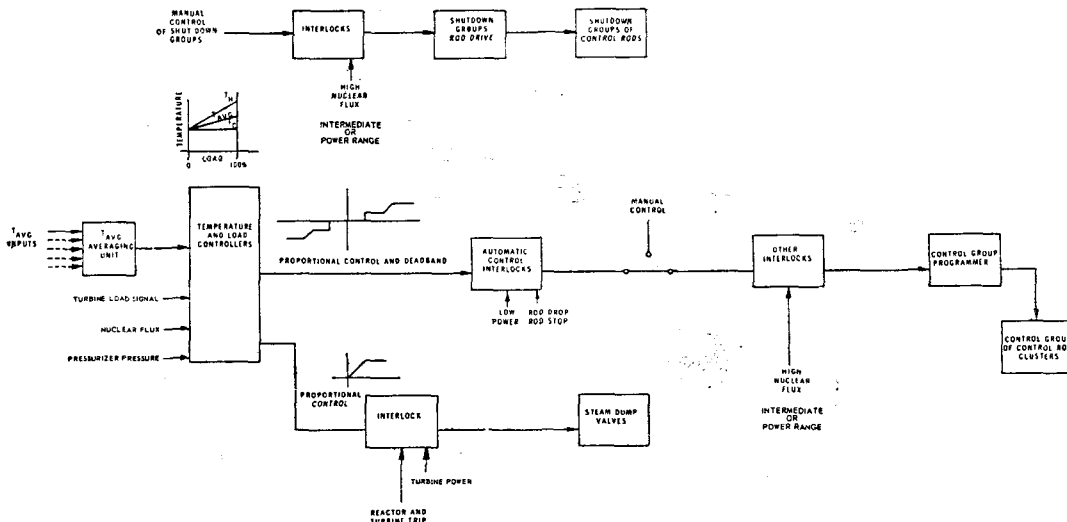


그림 3. Reactor Control System

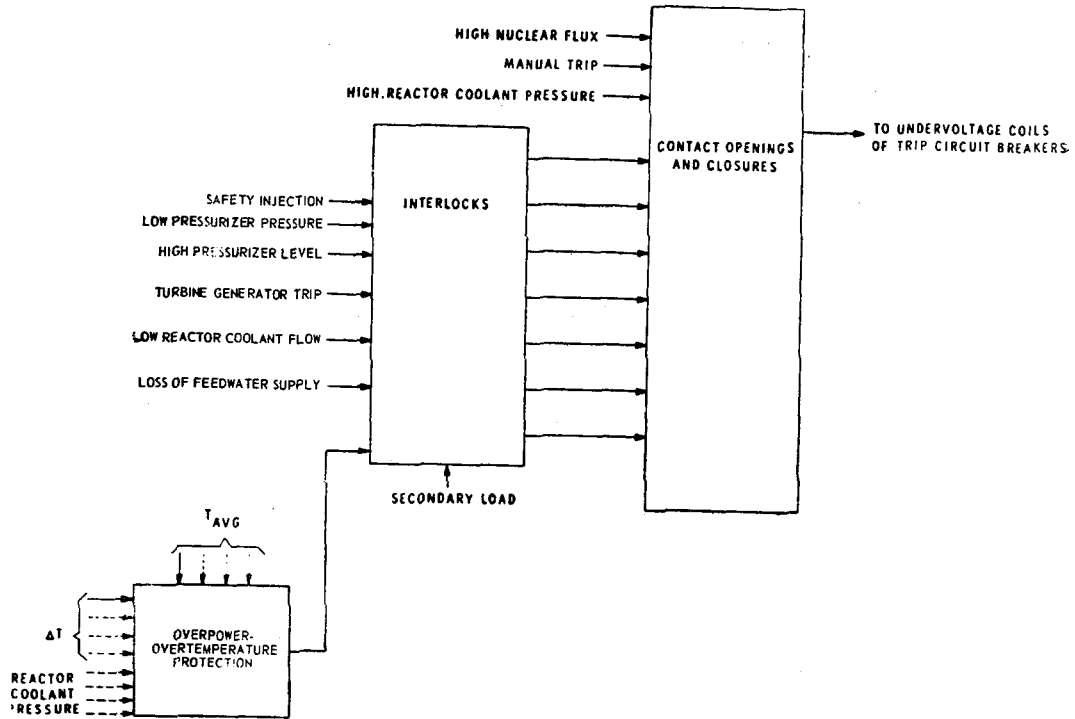


그림 4. Reactor Protection System

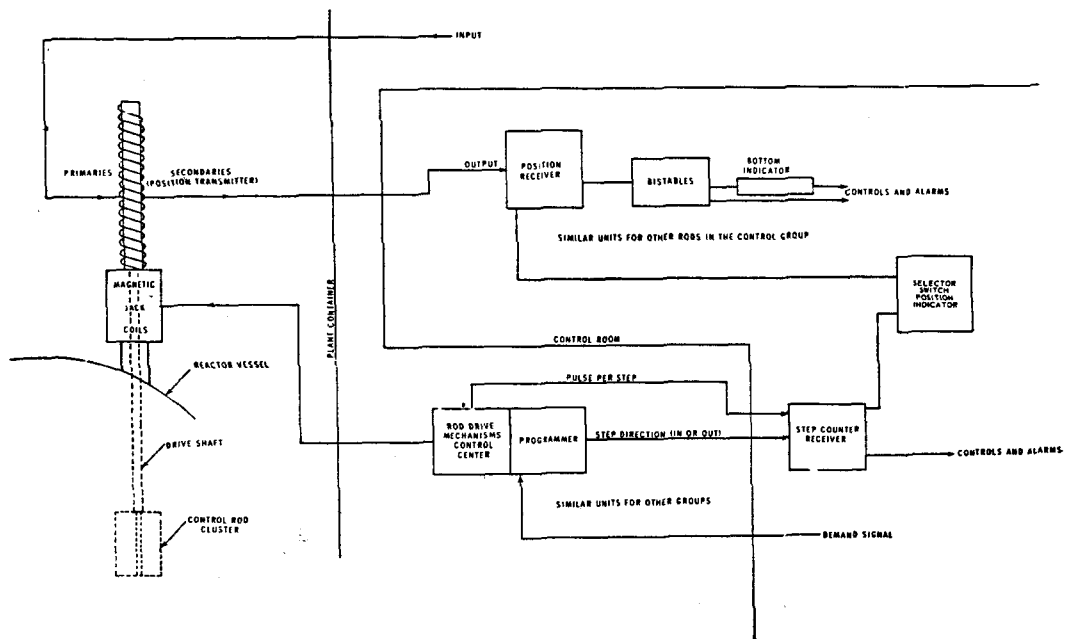


그림 5. Control Group-Rod Drive System

START-UP INSTRUMENTATION

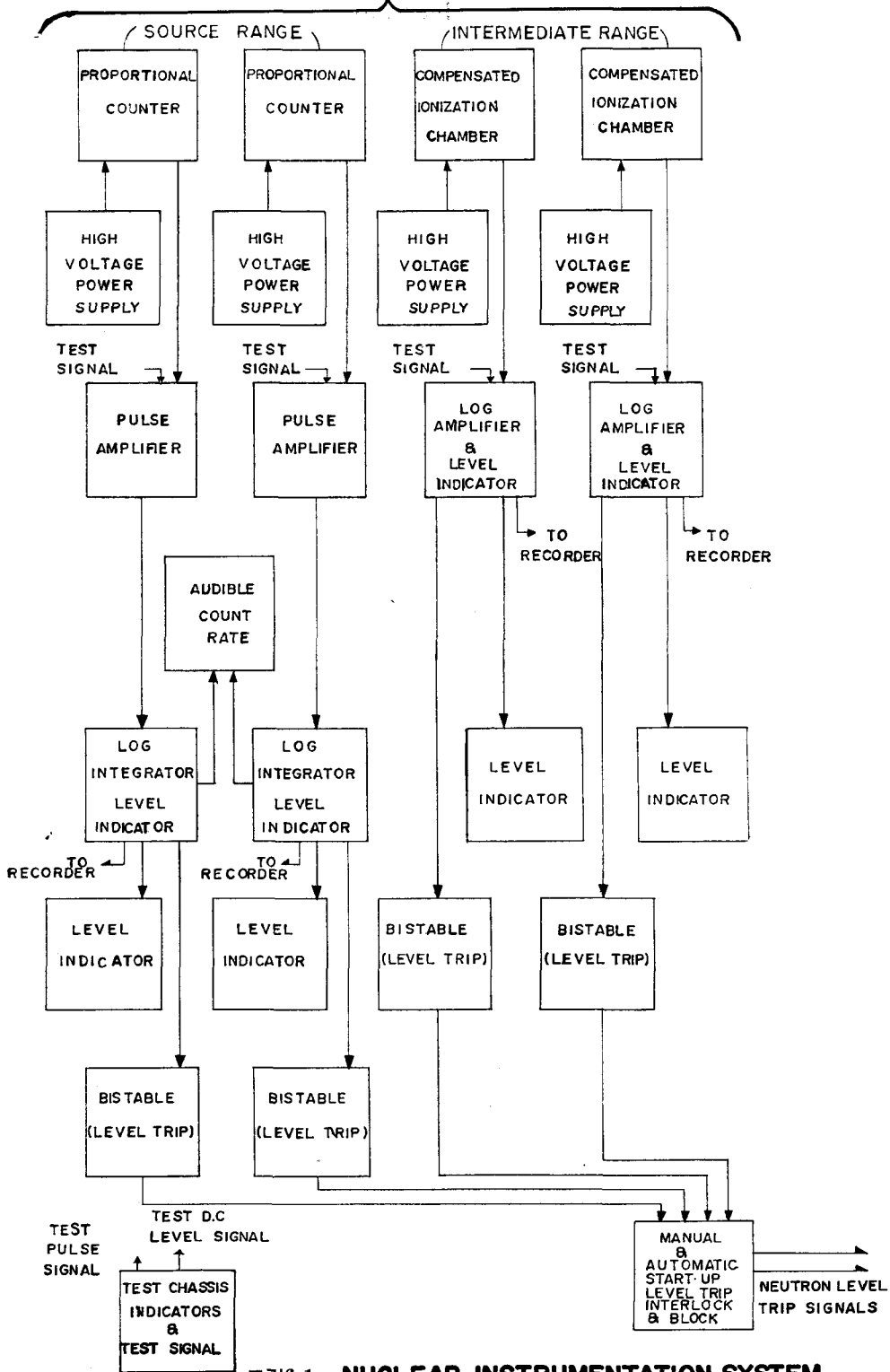
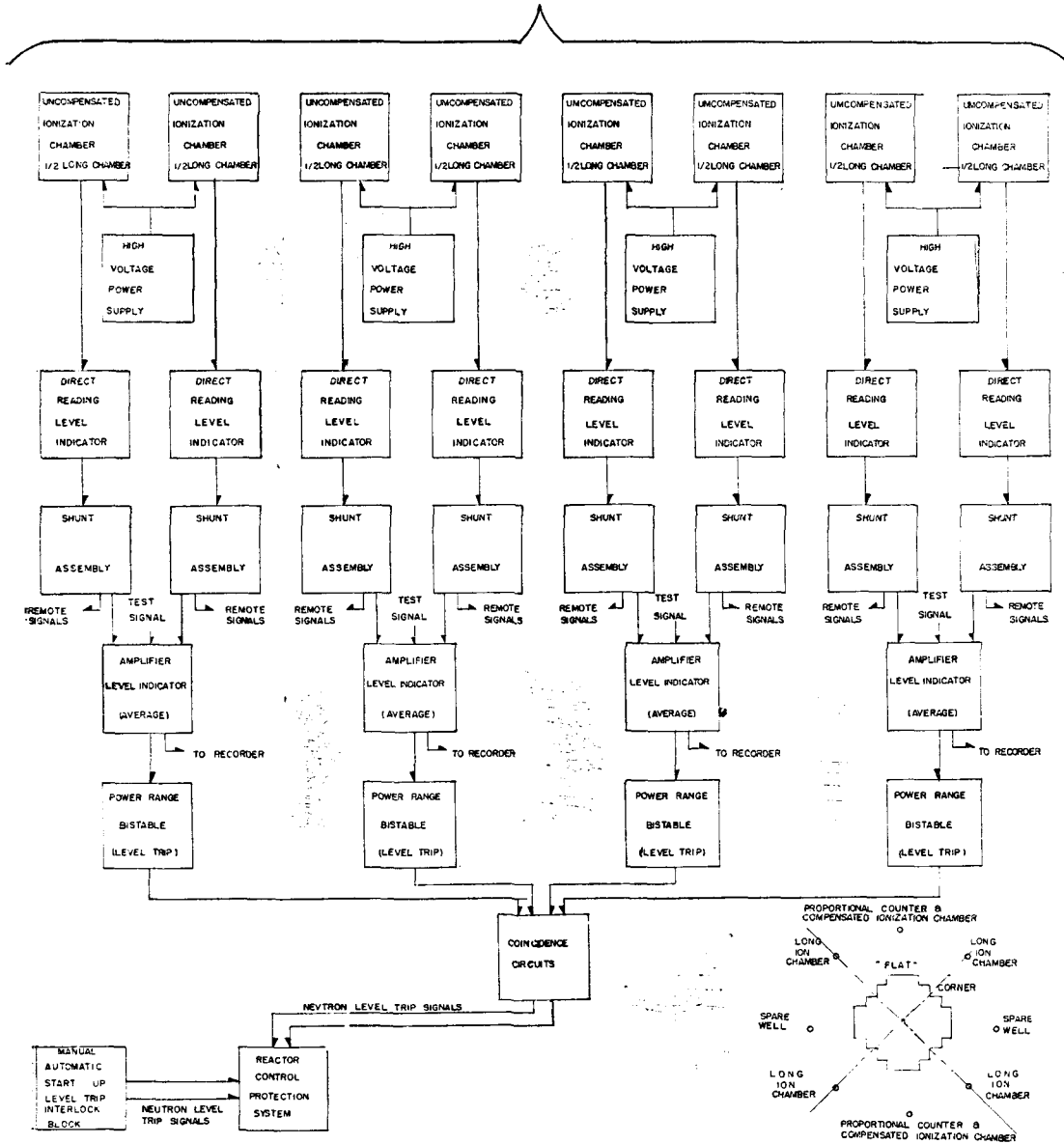


그림6-1. NUCLEAR INSTRUMENTATION SYSTEM

POWER RANGE INSTRUMENTATION



6-2. 그림 NUCLEAR INSTRUMENTATION SYSTEM

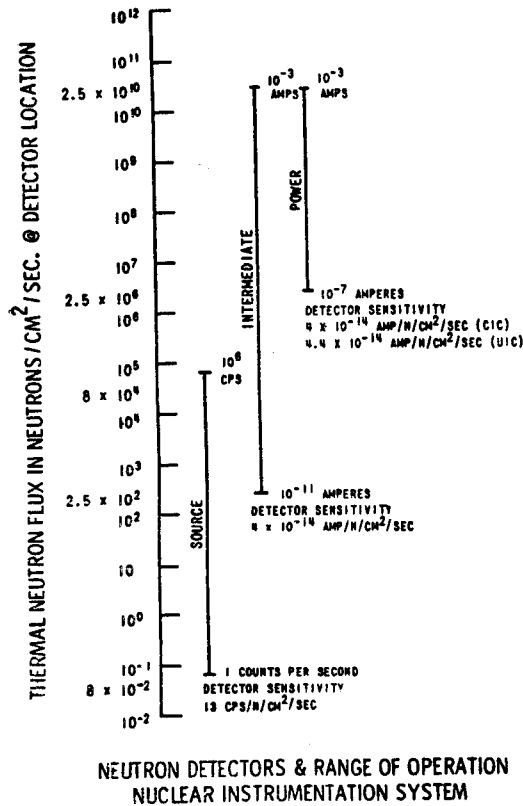


그림 6-3. Nuclear Instrumentation System

5. In-Core Instrumentation System

In-Core Instrumentation 계통은 원자로심 내의 선정된 점에서의 중성자속 분포와 연료집합체 출구에서의 냉각재 온도에 관한 자료를 제공해주며 이 자료를 이용하여 노심내 출력분포와 Hot Channel Factor를 감시할 수 있게 된다. 즉 In-Core Instrumentation 계통은 미리 정해진 위치에서 연료집합체출구의 냉각재 온도 측정용 Chromel-Alumel 열전대와 중성자속 분포 측정용 Flux Thimble(미리 선정된 연료집합체 내에 수직으로 관통해 있음)로 구성되어 있다.

이와 같이 노심내 온도와 중성자속 분포 측정 계통에서 얻은 자료는 이미 분석적인 방법에 의거 결정된 자료와 연관 시켜 노심의 전수명기간중 어느때라도 노심내 출력분포를 결정하는데 사용된다. 여사한 출력분포계산 방법은 계산적인 기법만을 사용하는 경우보다 더욱 정확하다는 것이 알려져 있다. 일단 핵분열반응에 의한 출력 분포가 결정되면 최대출력

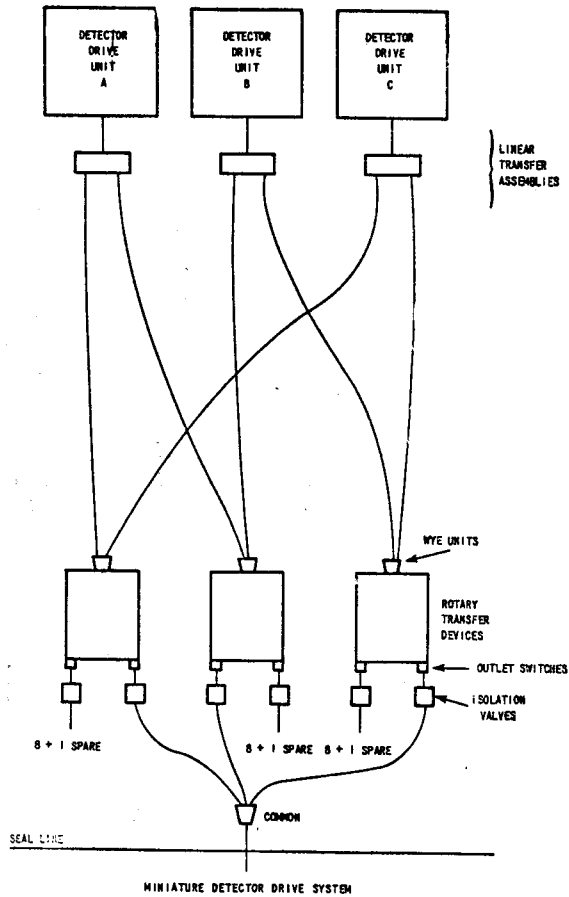


그림 7. Schematic of In-Core Flux Detector Drive System

은 우선 노심내의 열적, 수력학적 조건에 의하여 결정된다. 노심 Parameter 중 어떤 것은 그 최대치가 냉각재와 노심재질의 물리적 특성에 의하여 결정되는데 여기서 말한 물리적 특성이란 핵 연료의 용융점과 노심내 Hot Channel의 DNB(Departure From Nucleate Boiling) 조건을 말한다. 노심 최대 출력은 출력분포와 열적 및 수력학적 제한치를 종합하여 결정하게 된다.

이 외에도 In-Core Instrumentation 으로부터 냉각재 Enthalpy 분포, 연료 연소도 분포 및 냉각재 유량분포등을 산출하는데 사용되는 자료를 얻게된다. 또한 소음 및 동력학적 분석용으로 소형의 검출기(Miniature Detector)를 사용할 수도 있다.

끝으로 발전소의 전체적인 제어 특성은 다음과 같다.

