

《해설》

고리 원자력 발전소 개요—Ⅱ
(古里原子力 發電所 概要—Ⅱ)

정 보 현, 최 장 동

한국전력주식회사 원자력실

(Ⅱ) 노냉각재계통(Reactor
Coolant System)

1. 개 요

爐冷却材系統은 爐心에서 發生된 熱을 1次폐회로 내에 있는 증기발생기 까지 운반하는 계통으로서 이 열은 가압상태에 있는 보통의 물에 의하여 운송된다. 이 물은 노심에서 핵분열반응에 의하여 발생되는 열을 抽出하여 노심을 냉각시키고 (냉각재 : Coolant) 열을 증기발생기까지 운송하는 역할을 한다. 이 외에도 이 물은 핵분열반응에 의해서 발생되는 고속중성자(Fast Neutron 또는 Fission Neutron)를 열중성자(Thermal Neutron)로 감속시키는 이른바 감속재(Moderator)로서의 역할과 붕산 용매로서의 역할을 동시에 하게 된다. 붕산수의 농도를 조절함으로써 Xe Poison에 의한 반응의 과도적인 변화, 노정지, 기동 및 연료연소도(Burnup)등에 의한 반응도의 변화를 보상하게 되는데 이와 같은 반응도의 조절을 Chemical Shim Control이라 부른다.

노냉각재 계통은 원자로 압력용기(Reactor Vessel) 가압기(Pressurizer) 그리고 각각 하나의 증기발생기(Steam Generator)와 냉각재 순환펌프(Coolant Pump)를 갖고 있는 2개의 폐회로(Closed Loop)등 주요기기로 구성되어 있다.

2. 원자로압력용기(Reactor Vessel)

노용기는 대체로 원통형으로서 그 아래부분은 반원형 Bottom Head 로, 윗부분은 분리할 수 있게 된 Upper Head 로 되어있다. 이 용기안에 원자로심(Reactor Core), 노심 지지용구조물, 제어봉 Cluster, 열차폐 및 노심과 관계되는 기타 부분품들이 수용되게 된다.

냉각재의 Inlet Nozzle 과 Outlet Nozzle 은 Upper

Head Flange 와 노심 중간에 위치하게 된다. (전호 제6도 Reactor Vessel & Internals 참조) 노용기는 ASME Boiler 및 압력용기 Code Section III 에 맞도록 설계되는데 그 주요 설계 Parameter 는 표 1에 보인바와 같다.

노용기의 통체(筒體)는 Low Alloy Carbon Steel 로 되어있으며 냉각재와 접촉되는 용기 內面은 부식을 최소한으로 하기 위하여 최소 5/32 Inch 의 Austenitic Stainless Steel 로 피복한다.

표 1. REACTOR VESSEL
(TWO LOOP NSSS)

Reactor Vessel	
Overall length of assembled vessel, closure head and nozzles	39' 1"
Inside idiameter of shell	132"
Diameter across nozzles	17'-1"
Nominal Cladding thickness	7/32"
Minimum cladding thickness	5/32"
Coolant volume with core and internals in place	2408 ft ³
Operating pressure	2250 psia
Design pressure	2500 psia
Design temperature	650°F
Vessel materrial	Carbon steel
Cladding material	Stainless steel
Reactor coolant mass flow rate	67.3×10 ⁶ lbs/hr
Reactor coolant inlet temperature	545.4°F
Reactor coolant outlet temperature	610.9°F
Number of vessel material surveillance capsules, total	6
Reactor Vessel Weights	
Vessel shell	385,000 lbs.
Vessel shell lifting beam	22,000 lbs.
Shipping skid and ski	69,000 lbs.

Temporary cover plate	9,000 lbs.
Closure head	78,000 lbs.
Studs, nuts, washers, etc.	23,000 lbs.
Insulation	10,000 lbs
Reactor core and internals	360,000 lbs
Coolant (62.4 #/ft ³)	150,000 lbs
Lifting rig and ventilation shroud	22,500 lbs,
Mechanisms	63,000 lbs.

노용기는 냉각재 Nozzle 과 일체로 되어 있는 Steel Pad (노용기 지지물 : Vessel Support)로 지지되고 있으며, 이 Steel Pad 는 철강재의 원형 Girder (桁構) 위에 위치하고 있는 Base Plate 위에 언치게 되어있다. 원형 Girder 는 Reactor Cavity 의 콩크리트제 생물학적 차폐에 의하여 지지되고 있다.

운전중 열에 의한 노용기의 팽창수축을 흡수하기 위하여 지지용 Pad 와 상기 Base Plate 사이에 Sliding Surface 가 마련된다. 또한 Base Plate 의 상부에는 모든 Pipe 에 의한 負荷를 포함한 側方負荷에 견디고 노용기를 중앙에 유지하도록 Side Stop 이 具備된다

원자로심은 노용기의 원통부분(노용기 Bottom Head 와 냉각재 Nozzle 중간)에 수용된다. 열차폐는 하부 토심 지지용 Barrel Assembly 와 함께 냉각재가 노심내에 흘러 들어가도록 하는 냉각재의 하향류로(下向流路)를 형성하게 되며 또한 노심으로부터 방출되는 γ -Radiation 과 약간의 고속중성자를 감쇠시킴으로써 노용기를 이들 방사선의 조사(照射)로부터 보호하게 된다. 또한 열차폐는 γ 線 에너지에 의해서 발생하는 열로 인한 노용기내의 열응력(Thermal Stresses)을 감소시키는 역할을 한다.

두개의 금속제 원형환(O-Ring)을 Upper Head Flange 내의 두개의 동심원으로된 홈안에 설치하여 압력밀폐(Pressure Tight)를 형성하고 있으므로 노용기내 냉각재가 외부로 누설되는 것을 방지하고 있다. 이 O-Ring 은 O-Ring 내의 스롯트(Slot)를 통하여 O-Ring 내부에 노냉각재통 압력이 그대로 걸리도록한 일종의 자여식(Self-Energized) 압력밀폐 장치이다. 이 O-Ring 은 노용기의 Upper Head 내에 유지되므로 연료교환을 위해서 Head 를 Refueling Cavity 외부에 옮겨놓았을때 노후 O-Ring 의 대체작업과 점검을 시행할 수 있다. 이와 같은 이중(二重) O-Ring Seal 과 Flange 를 마련함으로써 노용기 가열(Heat up)이나 냉각시에도 외곽에 있는 2번째의 O-Ring 을 지나서 냉각재가 밖으로 누설되는 일이 없게된다. 두개의 O-Ring 사이의 공간은 하나의 온도 지지제와 연결되어 있고, 다시 냉각재계통의 Drain

Tank 에 연결되므로 만일 안쪽 O-Ring 의 압력밀폐능력이 상실되거나 결합이 생길경우 냉각재의 누설로 인하여 온도지지제는 고온을 가리키게되며 경보를 울리게되므로 냉각재가 외곽의 O-Ring 을 지나 노용기 외부로 누설되는 일이 없게 되며 안쪽 O-Ring 을 새어나온 냉각재는 Drain Tank 에 수집되어 처리된다.

한편 냉각재의 Inlet Nozzle 과 Outlet Nozzle 은 노심상부와 Flange 중간에 위치하게 되며, 제어봉구동용 Nozzle 은 노용기 Upper Head 에 자리잡게 된다. 노심내 계장장치(In-Core Instrumentation)용 Penetration 은 노용기의 제일 아래쪽에 있다.

노용기 외면은 전부 열절연을 시행하는데 노용기 개폐면 아래쪽부분의 열절연은 영구고정형이고 나머지 Upper Head 의 Stud 와 Flange 주위의 열절연은 대체할 수 있도록 되어있다. 모든 열절연면은 물이 새지 않도록되어 있고 20% 농도의 붕산에 대해서 충분한 내부식성을 갖고 있다. 열절연의 Chloride 농도는 Stainless Steel 의 부식을 방지하기 위해서 제한된다.

연료교환시의 Upper Head 취급을 위한 引揚設備(Lifting Frame)가 마련되는데 이 설비 하부에는 제어봉 구동기구에 사람이 접근할 수 있도록 플랫폼(Platform)이 있다.

다음에 노용기 제작에 사용된 재료를 간단히 간추려보면 아래와 같다.

구 분	재 료 명
Vessel Shell, Flange, Upper & Lower Head	Low Alloy Steel, Type A553 Grade B Class I A 508 Class 2
Coolant 와 접촉되는 모든 면	300 Series S/S 혹은 Inconel
Upper Head 취부용 Nut, Stud 및 Washer	540 Class III
Thermal shield	304 S/S (炭素함유량 최고 0.20%로 제한)
Coolant 와 접촉되지 않는 모든 외면	내열, 내방사선 및 내부식성 페인트 도장

고속중성자속 조사(高速中性子束照射)로 인한 금속재료의 특성변화를 감안하여 노심을 둘러싸고 있는 노용기벽 설계에 있어서는 다소의 여유를 두어야한다. 즉 고속중성자의 조사를 받으면 Ultimate Stre-

ngth와 Yield Strength는 증가되지만 Notch Ductility는 감소된다. Ductility 변화는 금속재료의 NDTT (Nil Ductility Transition Temperature)로 표시되며 Notch Ductility는 금속재료의 온도의 함수로서 허용응력을 설정하는데 사용된다. 어느 한 온도구간(최소 온도로부터 어느 높은 온도까지)에서의 NDTT의 변화는 고속증성자에 의한 누적증성자 조사량(NVT)의 다소에 따라 좌우된다. 고리에 건설될 원자로 설계는 NDTT 변화를 가장 큰 천이온도(Transition Temperature)의 변화를 기초로 결정하였으므로 상당한 여유가 있다는 결론이 된다.

압력과 부하가 걸리는 부분에 대해서 NDTT를 결정하기 위한 일련의 야금학적 시험을 행하는데 이 NDTT는 발전소 수명초기의 최소수압시험온도를 결정하게되며 이 온도는 NDTT 변동률 계산하기 위한 처음의 기준온도로 쓰인다. 압력용기의 NDTT 변화는 시험자료에 근거하여 예측하는데 이자료들은 주어진 고속증성자속조사에 대해서 보다 적은 변화를 나타내고 있다. 이와 같은 기준에 의하여 압력용기의 응력은 발전소 수명기간중 충분히 안전한제내에 있게 될 것으로 믿어진다.

표 2 Reactor Coolant Pumps

2 Vertical, single stage, shaft seal circulating water pumps.

Design Data

Design capacity.	89,000 gpm
Design head	262 ft.
Design pressure	2500 psia
Design temperature	650°F
Suction temperature at full power	545.8°F
Motor type	AC induction
Motor voltage	4,160 volts
Casing diameter	6' 0"
Overall height	27' 8-1/2"
Operating speed	1189 rpm
Ambient temperature	120°F
Motor temperature rise above ambient, °C	60 (By thermometer)
(with coolant temp. $\geq 500^\circ\text{F}$)	70 (By resistance)
Motor insulation	Class B, thermalastic epoxy
Minimum starting voltage	80% of motor voltage

Operating conditions at specified

ambient temperature

Continuous operation with reactor coolant temperature $\geq 500^\circ\text{F}$. Continuous operation for maximum of 50 hrs. with coolant at 70°F , with a lifetime cumulative total of 3,000 hours at 70°F .

Total rotating inertia, pump and motor

82,000 lb-ft²

Noise level

115 db on standard C scale, 5 feet from motor.

Reactor Coolant Pump Weights

Motor	70,000 lbs
Casing	30,000 lbs
Pump	50,000 lbs
Reactor coolant (62.4 #/ft ³)	7,000 lbs

3. 냉각재 순환펌프(Reactor Coolant Pump)

각 1차 Loop는 고온, 고압에서 대량의 냉각재를 순환시키도록 설계된 냉각재 순환펌프를 갖고 있는데 이 Pump는 수축(垂軸) 一段 Centrifugal Pump로서 특히 냉각재의 누설을 제어할 수 있도록 되어있다. 그림 1은 대표적인 Controlled Leakage Pump이며 주요설계 Parameter는 표 2에 보인 바와 같다. 전 Unit는 상부로부터 전동기, Seal Assembly, 및 Hydraulic Unit로 구성되어 있는데 아래서 좀더 상세히 설명한다.

가. Hydraulic Unit

원자로 냉각재는 Pump Rotor Shaft 하부에 취부돼 있는 Impeller에 의하여 양수된다. 즉 냉각재는 Casing 하부 Impeller를 거쳐, 다시 Diffuser를 통하여 방수된다. Diffuser는 Impeller로부터의 속도수두를 압력수두로 변환시키는데 사용되며 Circular Casing은 Flow를 모아 放射狀으로 방출한다.

Motor Pump는 Casing을 배관으로부터 분리시키지 않고서도 보수점검을 하기 위하여 Casing으로부터 한명어리로 분리 인출(引出)할 수 있다.

원자로 냉각재와 접촉되는 부분은 Bearing이나 기타 특수한 부분을 제외하고서는 모두 Stainless

Steel 로 제작된다.

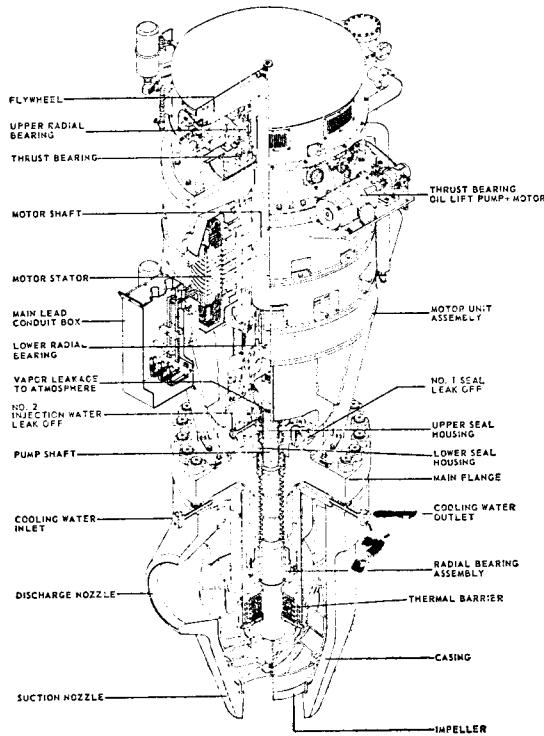


그림 1 대표적인 Controlled Leakage Pump
(Reactor Coolant Pump)

나. 열교환기 (Heat Exchanger)

Stainless Steel 튜부로된 일종의 Coil Type Heat Exchanger 가 베어링 (Water Lubricated Radial Bearing) 하부, Casing 안쪽에 설치 되어있어 저압의 냉각수가 이 열교환기 튜부내로 순환함으로써 베어링을 냉각시킨다. 정상운전중에는 저류량의 주입수가 Coil 내에 흐르고 따라서 이때 최소한의 열교환기의 냉각기능이 필요하게 되므로 Cooler 에 부과되는 부하는 아주 작게된다. Cooler 의 주목적은 주입수가 없어질 경우 Water Lubricated Bearing 과 Seal System 을 고온가열되지 않도록 보호하는데 있다.

다. Lower Bearing

Motor-Pump Assembly 에는 모두 세개의 Radial Bearing 이 있는데 이중 2개는 Motor 내에 있으며 나머지 하나는 전술한 열교환기 상부, Seal Assembly 아래쪽 Pump 내에 설치되어있다. 이것은 Carbon-Graphite 로 만들어진 Water Lubricated Bearing 으로서 Stellite 로 피복된 Stainless Steel Journal 내에서 운전된다.

라. Injection Water

Injection Water 는 펌프의 상하부와 Seal Assembly 를 냉각시킴과 동시에 상기 Lower Bearing 과 Seal System 에 깨끗한 물을 공급한다. 정상 운전중에는 8 gallons/min. 의 유속으로 注入되는데 이중 5 gallons/min. 는 Cooler Assembly 를 통하여 아래로 흘러 내려가 축을 따라 Casing 내에 흘러 들어가게 되는데 이때 축과 열경계부에 의한 전도열을 제거하게된다. 注入水 나머지 3 gallons/min. 는 윗쪽으로 흘러올라가 Water Lubricated Radial Bearing 을 통하여 Seal Assembly 로 흘러간다. 그림 2 는 Controlled Leakage Seal System 이다. 여기서 보는 바와 같이 직렬로 배열된 세개의 Face-Type Seal 로 구성되어있다. 웨스팅하우스 설계제품인 이 Seal System 은 이미 운전중에 있는 원자로 냉각재 순환 펌프에 사용되고 있는 것이다. Shaft Seal System 에 관해서 다음에 좀더 자세히 설명하기로 한다.

No. 1 Seal:

No. 1 Seal 은 이름 그대로 1次 Seal 로서 Lower Radial Bearing 상부에 설치되어 있으며 Seal 계통

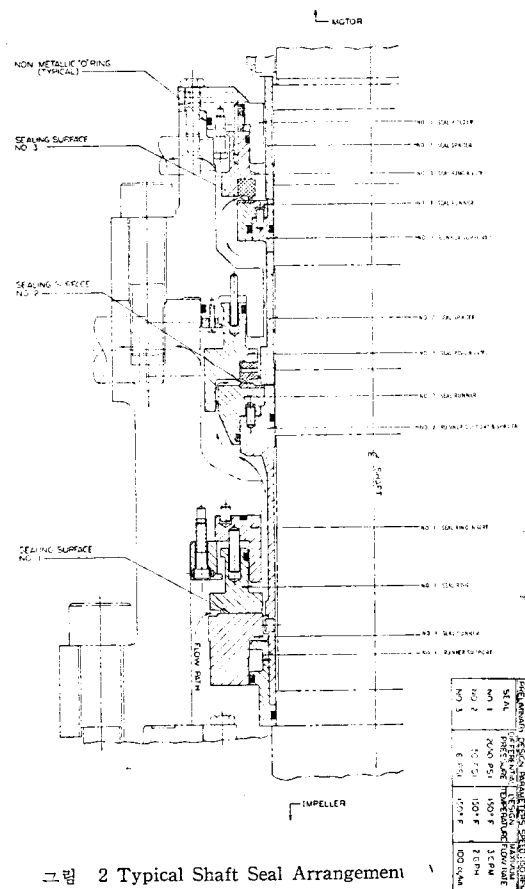


그림 2 Typical Shaft Seal Arrangement

에서 가장 중요한 부분이다. 이것은 근본적으로 Film Riding Face Seal인데 Seal 계통의 압력강하로 (Water Film)이 생기게하며 이 Film. 을 존속시키기 위해서 Seal System 을 회전시킬 필요가 없다. 보통 계통 운전압력에서 Seal 을 위한 누설율은 3 Gallons/min. 이다. 또한 이 Seal 은 축표면에 형성되는 얇은 水膜위에 타게 되므로 Runner 와 접촉되지 않아 마모현상이 일어나지 않는다.

No. 2 Seal:

이 Seal 은 보통 약 50 Psi 압력에서 No.1 Seal 로부터의 누설량 3 geallons/min. 을 받아드리고 있다. No.2 Seal 의 정상 누설율은 3 gollons/hr 이다. 이 No.2 Seal 은 회전 Runner 와 탄소로 만들어진 고정 Member 를 가진 재래식 Rubbing Face Type Seal 이다. 보통 이 Seal 은 고압 50 Psi 의 압력에 견디게 되어 있으나 긴급시에는 회전상태나 고정상태에서 Seal 면을 통하여 계통 전압력으로 운전할 수 있도록 설계되어 있다. 그러나 이와 같은 긴급상태에서의 운전은 Seal 의 수명을 단축시킬 염려가 있으므로 일차 냉각재의 대량누설을 방지하면서 계통을 정상운전절차에 따라 정지시키는 동안의 제한된 시간동안에 한하여 이와 같은 긴급운전이 허용된다.

No. 3 Seal :

이 세번째의 Seal 은 저압에서 운전되는 보다 작은 Rubbing Face Type Seal 로서 격납용기내로의 냉각재 누설율을 100cc/hr 로 제한 하도록 설계되어 있다. 이 미량의 누설량은 Seal 면을 윤활시키고 냉시킨다. No. 3 Seal 은 설계나 재료에 있어서 No.2 Seal 과 흡사하다.

4. 전동기(Motor)

냉각재 순환펌프구동용 전동기는 垂直軸, 定速, 空冷式 3상 Squirrel Cage 유도 전동기로서 Therm-alastic Epoxy Insulation 계통을 갖고있다. 회전자와 고정자는 재래식 설계에 의한 것이다. 전동기 회전자상부에는 하나의 방사상의 안내축수(Radial Guide Bearing)가 설치되어 있는데 윤활유통속에서 운전된다. 이 윤활유통은 하나의 열교환기를 갖고 있으며 그 내부로 저압의 냉각수를 순환시키도록 되어있어 안내축수의 과열을 방지하게끔 되어있다.

고정자상부에는 Kingsbury 형 추력축수(Kingsbury Type Thrust Bearing) 하나가 설치되어 있는데 윤활유에 의하여 냉각되는 유명식 Bearing 으로서 기름은 Thrust Runner 와 일체로써 있는 펌프에 의하여 순환된다. 이 기름은 또한 상부의 방사상 안내축

수와, 별도의 열교환기를 통하여 순환되며 열교환기에서 냉각된다.

상부 Radial Guide Bearing 은 하부 Bearing 과 흡사하고 추력축수에는 기동용 Oil Lift System 이 마련돼 있다.

또한 전동기가 휴지중에 있는 동안 권선(Winding)을 건조한 상태로 유지하기 위하여 전동기에 공간가열용 Heater 가 설치된다. 냉각재순환계통에 있는 다른 한대의 펌프가 운전되고 있을때 휴지중에 있는 펌프의 역회전을 방지하기 위한 기구로서 Anti-Reverse Devcre 가 구비된다.

전동기 구동용 전원이 없어졌을 경우 후속조치가 취해질때까지 충분한 Core Flow 를 유지하기 위하여 전동기에는 Flywheel 을 다는데 이것은 총 회전관성을 증가시킴으로써 이경우 펌프의 Coastdown 이 오래 유지되도록 한다. 즉 이와 같은 조치는 원자로제어 및 보호계통과 함께 구동용 전원 일실사고가 발생하였을 경우 충분한 Core Flow 를 확보함으로써노심을 보호하게 된다.

5. 증기발생기(Steam Generator)

노냉각재계통의 각 Loop 에는 하나의 증기 발생기가 있는데 증기발생기는 증기발생기 부분과 드럼부분으로 구성되고 있다. 증기발생기 부분은 U자형 튜브로된 열교환기로 구성되고 있으며 증기드럼부분에는 수분분리기(Moisture Separator)가 들어있다. 증기발생기는 Shell 상부에 위치하는 수분분리기와 함께 수직으로 설치된다. 대표적인 증기발생기는 그림 3에 보인바와 같으며 주요설계 자료는 표에 보인바와 같다.

고온고압의 노냉각재는 Channel Head 에 유입되며 다시 U자형 튜브를 통하여 Channel Head 의 Outlet Section 에 돌아오게 된다. 이과정에서 2次側 급수를 가열하여 증기를 발생시킴으로서 열교환이 이루어 진다. Channel Head 는 분리판에 의하여 유입부(Inlet Section)와 유출부(Outlet Section)로 양분돼 있으며 각 Section 에는 점점 보수용 출입구가 마련돼 있다. U자형 튜브는 냉각재가 二차회로에 누설되지 않도록 Tube Plate 에 용접하며 증기와 물로된 二相流體의 흐름을 용이하게하는 구조를 갖고있는 수평지지판에 의하여 적당한 구간마다 지지되고 있다.

한편 급수는 수분분리기 아래쪽 Shell 에 들어가서 環狀分岐管 (Ring Manifold)에 의하여 배수된다. 여기서 급수는 Shell 측 재순환수와 혼합되고 Shell

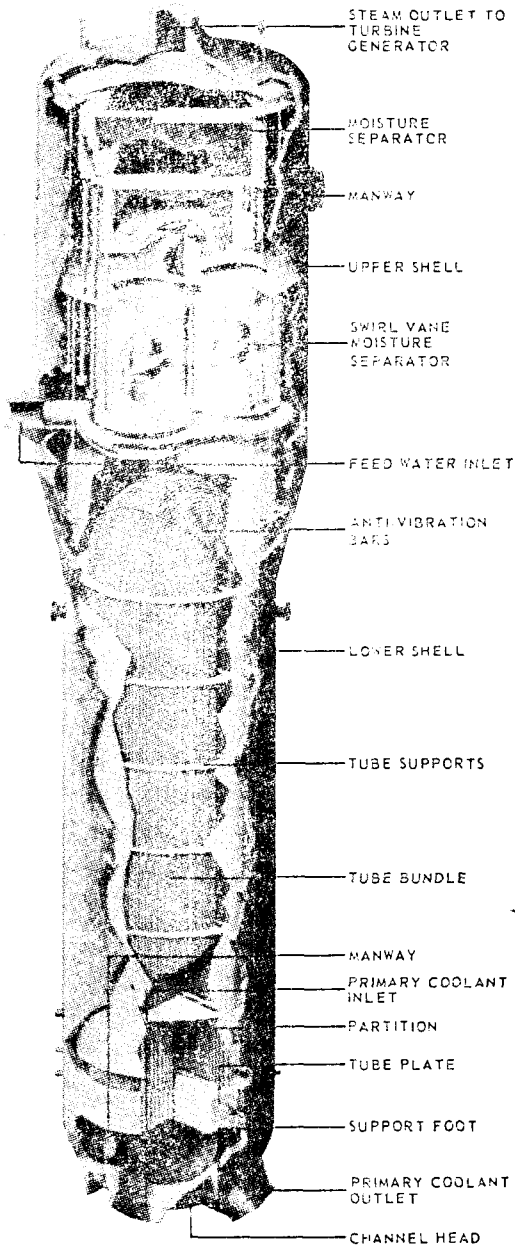


그림. 3. Steam Generator

과 Tube Bundle 주위의 Shroud로 형성되는 環形流路(Annulus)를 통하여 아래로 흘러 내려간다. Shell의 하부 근처에서 이 아포화수(Sub-Cooled)는 튜브 주위에 방사상으로 유입되고 여기에서 포화온도까지

가열되어 비등하게 된다. 전술한 바와 같이 튜브집합체 상부에 위치하고 있는 수분분리기는 증기내에 함유되어 있는 대부분의 수분을 원심분리작용에 의하여 분리시킨다. 다시 수분이 분리된 수증기는 증기건조기(Steam Dryer)에서 Steam Quality가 증가되어 최소 99.75%의 (수분함유량 0.25%) Quality를 갖게 된다. 분리된 수분은 증기 발생기에 유입되는 급수와 함께 대류작용에 의하여 Tube Bundle에 돌아온다.

증기드럼에는 증기건조기의 점검보수를 위한 출입구가 있는데 평상시 이것은 가스켓트를 끼우고 볼트로 조여 폐쇄해 둔다. 이 출입구를 통하여 증기건조기를 분리인출하여 보수할 수 있게 된다. 또한 이와 흡사한 2개의 출입구가 Shell 하부에 있는데 이것은 Tube의 Shell 측을 점검하는데 사용된다.

표 3 Steam Generators

2 Vertical U-tube steam generator with integral steam drum.

Design Data

Height overall	66'-8"
Upper shell OD	175-3/4"
Lower shell OD	135"
Operating pressure, tube side	2250 psia
Design pressure, tube side	2500 psia
Design temperature, tube side	650°F
Full load pressure, shell side	800 psia
Maximum moisture at outlet (full load), %	1/4
Design pressure, shell side	1100 psia
Reactor coolant flow rate	33.65×10 ⁶ lbs/hr
Reactor coolant inlet temperature	610.9
Reactor coolant outlet temperature	545.2
Shell material	Mn-Mb steel
Channel head material	Carbon steel clad internally with stainless steel
Tube sheet material	Mn-Mb steel clad internally with Inconel
Tube material	Inconel
Tube OD	7/8"
Minimum tube wall thickness, in	0.050"

Steam Generator Weights

Dry Weight, in place	653,000 lbs
Normal operating weight, in place	794,000 lbs
Flooded weight (cold)	1,088,000 lbs

6. 배관 및 열전연

냉각재계통배관은 Stainless Steel 이거나 Stainless Steel 로 피복한 Carbon Steel 이다. 가압기의 Safety valve 와 Relief Valve 를 Pressurizer Relief Tank 의 Nozzle 까지 연결하는 Pressurizer Relief Line 과 Pressurizer Relief Tank 의 질소공급관, 배기관 및 Drain 은 탄소강으로 제조된다.

가압기써지(Pressurizer Surge) 및 Spray Line, Loop Drain 및 기타 계통과의 연결관은 Austenitic Stainless Steel 로 제조 된다. Flange 로 연결되는 Pressurizer Safety Valve Outlet Nozzle 을 제외하고서는 모든 결합부는 용접된다. 과도시의 유체온도의 급변에 의해서 심한 열응력이 발생할 위험성이있는 곳에는 Thermal Sleeve 를 설치한다.

그리고 열손실을 감소시키기 위해서 좀 높은 온도에서 운전되는 Valve, 배관 및 機器中 아래에 열거한 경우를 제외하고서는 모두 열전연을 행한다.

a. Safety 및 Relief Valve 방출관은 인명보호를위하여 국부적으로 차폐한다.

b. 계기, 전기기기, 제어봉구동기구 및 가압기 전 열기의 전기적 결합부등과 같이 냉각할 필요가 있는 곳에는 열전연을 행하지 않는다.

c. Pressurizer Relief Tank 와 이에 관련된 Vent, Drain 등에는 열전연을 하지 않는다.

7. 밸브(Valve)

원자로 냉각재와 접촉되는 모든 Valve 는 원칙적으로 Austenitic Stainless Steel 이나 경고하게 표면처리한 내부식성의 특수재료로 제조한다. Pressurizer 의 Safety Valve 는 Back Pressure Compensation 을 갖고 있는 Spring-Loaded, Self-Actuating 형이다. 가압기는 또한 전동기로 구동되는 Relief Valve 를 갖고 있어 과압으로 인한 손상으로부터 1차계통을 자동적으로 보호한다. 또한 만일 Relief Valve 를 통하여 과도한 냉각재의 누설현상이 일어날 경우 Relief Valve 를 분리시키기 위하여 원방조작할 수 있는 Stop Valve 가 설치된다.

가압기에는 Automatic Spray Valve 가 있어서 Overpressure 제어용 가압기 Spray 를 조정할 수 있으며 현장에서 조정할 수 있는 Throttling Valve 가 Spray Control Valve 와 병렬로 설치되어 있어서 각

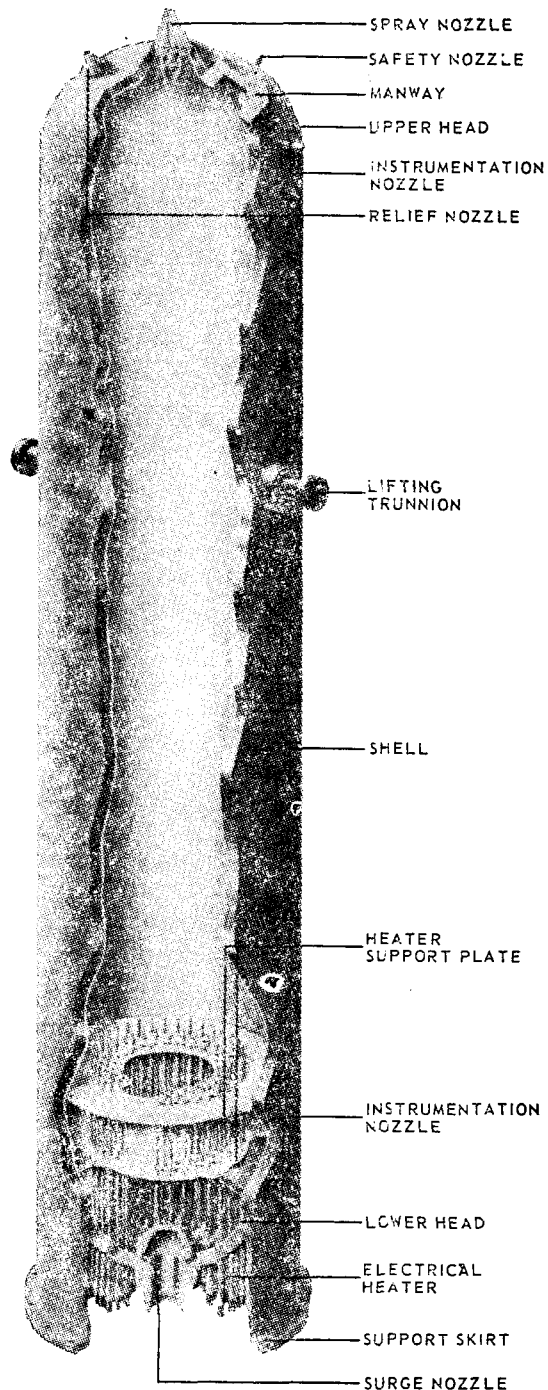


그림. 4 PWR Pressurizer

Spray Line 을 통하여 가압기내에 소량의 유량을 계속공급한다.

일차계통을 충수시키기 위하여 각부에는 배기관이 설치되는데 이것은 Blind Flange 에 연결되는 Stop Valve 를 갖고 있다. 배기관을 통하여 방출되는 여하한 냉각재도 일단 하나의 용기에 집수되거나 Drain 되도록 배관하였으므로 물이 밖으로 넘쳐흐를 염려가 없게된다.

또한 원방조작할 수 있는 Valve 들이 있어서 Pressurizer Relief Tank 의 물보충, 배기 및 Drain 을 제어하게 되어 있다.

8. 압력제어(Pressure Control)

일차계통에 있는 가압기의 역할은 정상운전중 노냉각재계통의 압력을 어느 일정치에 유지하고 과도상태에 있어서의 압력변화를 제한하는 것이다. 일차계통의 압력제어를 위하여 가압기에는 대체할 수 있는 전열이 가압기하부 물속에 설치되며—(壓力降下防止措置)—또한 Spray Nozzle 이 있어서 가압기내에 물을 Spray 하거나 일차계통압력이 어느 미리 설정된 값 이상으로 상승하여 과도상태로 될 경우 Relief Valve 가 동작하여 Pressurizer Relief Tank 에 압력을 방출 하도록 되어 있다—(壓力上昇防止措置)—. 그림 4 는 대표적인 가압기이며 압력제어계통의 주요설계 Parameter 들은 표 4 에 보인 바와 같다.

표 4 Pressurizer

1 Two phase water steam pressurizer.

Design Data

Overall height	32'-6"
Overall diameter	7'-8-3/8"
Water volume (full load)	600 ft ³
Steam volume (full load)	400ft ³
Design pressure	2500 psia
Design temperature	680°F
Type of heaters	Electric immersion
Number of heaters	78
Installed heater power	1000 kw
Number of relief valves	2 power-operated
Number of safety valves	2 self-actuating
Spray rate	
Pressure transient	420 gpm
Continuous	1 gpr

Shell material	Carbon steel clad internally with stainless steel
Dry weight	144,000 lbs
Normal operating weight	169,000 lbs
Flooded weight (cold)	207,000 lbs
Pressurizer Relief Tank	
Length overall	17'-6"
Diameter overall	8'-0"
Volume	1000 ft ³
Design pressure	100 psig
Design temperature	310°F
Material	Carbon steel clad internally with corrosion resistant coating
Dry weight	12,500 lbs.
Normal operating weight	37,500 lbs.

정상운전중 가열기의 하반부는 물론, 나머지 상반부는 증기로 차게되는데 가압기 하부 수중에 설치되어 있는 전열기에 의해서 물을 포화온도에 유지하고 따라서 계통운전 압력을 일정치에 유지하게 된다.

좀더 구체적인 경우로서 발전소 전기부하의 증감에 따른 일차계통의 압력제어현상을 살펴보면 다음과같다.

첫째 발전소의 전기부하가 갑자기 감소되면 우선 노냉각재의 평균온도는 상승되고 냉각재의 부피가 증가하게 된다. 냉각재의 부피증가에 따라 가압기내의 수위가 상승하게 되어 Steam Space 가 압축되어 계통압력이 높아지게 된다. 이 압력상승으로 인하여 Spray Line 에 있는 Valve 가 동작하게되어 Coolant Loop 의 Cold Leg 로부터 Reactor Coolant 가 Steam Space 에 Spray 됨으로써 증기의 일부를 응결시킨다 즉 이와 같은 消壓作用(Quenching Action)에 의하여 압력상승을 제한하게 된다.

둘째, 반대로 발전소의 전기부하가 갑자기 증가될 경우 일단 노냉각재의 평균온도는 하강하고 부피가 수축된다. 따라서 냉각재는 가압기의 수위와 압력을 감소시키면서 가압기로부터 냉각재 순환 Loop 내로 흐른다. 이때 가압기내의 물은 이 압력강하를 제한하기 위하여 일부 Steam Space 로 Flash 하여 감압현상을 다소 방지하지만 또한 水浸型전열기의 접촉자를 동시에 폐쇄시킴으로서 가압기내의 나머지 물을 가열시켜 그 이상의 압력감소를 제한하게된다.

다음에 Pressurizer Spray System 의 압력제한 능

력을 넘을 정도의 압력증가를 수반하는 전기부하 일일 사고시에는 전동기로 구동되는 Pressure Relief Valve가 동작하게 되는데 이들 Valve는 계통설계압력치 이하의 어느 압력에서 자동적으로 개방되어 계통을 과압으로부터 보호하게 된다. 이들 Valve는 또한 Control Room으로부터 수동조작으로 개방할 수도 있다. 만일 그 이상 압력이 증가하게 되면 Safety Valve가 동작하게 된다. Relief Valve로부터 나오는 증기는 Pressurizer Relief Tank에 방출되는데 여기에는 격납설비내의 주위온도로 유지되고있는 물이 있어서 이물속에 Spray되어 냉각, 응결된다. 이 Tank수면 상부는 질소개스로 충전되고 있다. 또한 이 Tank의 열흡수능력(Heat Sink Capability)을 증가시키기 위하여 냉수를 탱크내에 Spray할 수도 있게 되어있으며 Tank에는 Rupture Disc가 있어서 증기를 격납설비에 배출할 수 있어 설계압력 이상으로 상승하는 것을 막을 수 있게 되어있다.

9. 냉각재 계통 운전

냉각재계통운전은 기동, 정상운전 및 정지의 세가지로 구분 설명명한다.

가. 기동(Startup)

Startup이란 냉각재계통을 冷停止(Cold Shutdown)상태로부터 零出力 운전온도와 운전압력까지 가열시키는 조작으로 정의할 수 있다.

계통을 가열하기 전에는 냉각재계통과 가압기는 봉산을 함유한 물로 차 있고 증기발생기의 Shell 측은 2차회로(터빈 Plant)의 급수의 화학적특성에 부합하는 給水로 차있게되는 것이 보통이다.

이런 상태에서 로냉각재계통을 기동하려면 우선 냉각재순환펌프를 단속적으로 운전하여 계통을 Vent시키며 펌프운전중에 Volume Control System에 있는 하나의 Charging Pump와 低壓 Letdown Valve를 운전하여 계통압력을 약 350 psig에 유지시킨다 이때 Charging Pump는 또한 펌프 Seal에 Seal용 Injection Water를 공급하게 된다. 그리고 Pressurizer Relief Tank내의 질소개스를 충전하고 정상 운전수위를 유지한다. Vent가 끝난後 모든 노냉각재 순환펌프를 정지하고 가압기내의 전열기를 동작시킨다. 이와같이 전열기의 동작에 의하여 가압기내의 수온이 212°F (100°C)를 넘으면 저압 Letdown Valve를 수동제어에 두고 가압기수위를 零出力水位(Zero Power Water Level)까지 배수한다. 이때 수위가 낮아짐에 따라 가압기내에서는 일시적으로 Flashing 현상이 일어나 수면 윗부분에 Steam Volume

이 형성된다. 계통압력이 대체로 350 psig에 복귀하면 전열기에 공급되는 전력과 가압기 Spray Valve를 조정하여 일정압력에 유지한다.

다음에 냉각재 순환펌프를 한대씩 기동하고 RHRS(Residual Heat Removal System)를 정지(만일 운전되고 있었다면)시킨다. 냉각재중의 봉산농도를 정상운전농도로 조정하고 냉각재에 수소를 추가하기 위하여 Charging Flow와 Letdown Flow를 정상상태 용유량에 유지시킨다.

冷機상태에 있어서는 냉각재의 반응도 온도계수가 正으로 되므로 냉각재의 온도계수가 노심이 임계(Criticality)에 도달하기 전에 負溫度係數(Negative Moderator Coefficient)로 나타나기 시작하는 온도까지 냉각재를 가열하는에는 냉각재순환펌프의 펌프작용에 의한 냉각재의 Enthalpy 증가가 사용된다. 즉 환언하면 냉각재순환펌프의 펌프작용에 의한 Enthalpy 증가에 의하여 냉각재의 온도계수가 正인 냉기상태로부터 온도계수가 負로되는(임계에 도달하기 전에) 온도까지 계통을 Heatup하게 된다.

이와 같이하여 냉각재의 온도가 냉각재순환펌프에 의하여 負의 온도계수를 갖는 점까지 가열된 다음에는 노출력에 의하여 계통온도를 Hot Standby(零出力) 온도까지 가열하게 된다. 한편 노냉각재의 온도가 상승함에 따라 운전원은 냉각재순환펌프에 충분한 Suction Pressure를 유지시켜주기 위하여 전열기와 가압기 Spray Valve를 제어한다. 또한 계통이 정상 운전 압력에 도달하면 가압기의 전열기와 Spray Valve로 수동제어로부터 자동제어위치에 전환시킨다.

나. 정상운전(Normal Operation)

정상운전이란 정상의 운전 압력과 온도에서 계통을 운전하는 것을 말한다. 전술의 “기동(Startup)” 과정에 의하여 계통이 정상 운전압력에 도달한 후의 정상운전중에는 압력제어기기(Pressure Control Equipment)에 의하여 운전압력을 일정하게 유지하며 가압기의 수위는 Chemical & Volume Control System의 Charging Flow Control에 의하여 제어된다. 그리고 가압기의 水位 Set Point는 냉각재의 평균 온도와 로출력에 따라 변동된다.

원자로가 출력운전을 하고 있을때는 노제어 및 보호계통에 의하여 계통온도를 제어하게되는데 출력이 미리정해진 어느 출력(실제로는 전출력에 대한 백분율로 표시됨)보다 낮은 범위에서는 운전원의 수동조작에 의하여 제어한다. 노출력이 미리정해진 어느출

력보다 높을때 노냉각재의 온도는 원자로제어 및 보호계통에 의하여 자동적으로 일정한 값에 유지된다.

그리고 원자로가 아임계(Subcritical)에 있는 Hot shutdown (溫機停止)중에는 증기를 터빈 복수기에 직접 Bypass 시켜 가압기내의 압력을 일정치에 유지시킴으로써 계통온도를 유지하게된다. 이때 노심과 냉각재 펌프운전으로 인한 Residual Heat 는 계통열손실을 보상하는데 사용된다.

가압기 Relief Tank 는 오직 Safety Valve 나 Relief 가 증기를 방출할때에 한하여 사용되는 설비인데 만일 이들 Valve 로 부터 Tank 에 증기가 방출되면 Tank 내 수온은 그 정상수온인 120°F 를 초과하고 Tank 내 수위는 상승하게된다. 그러나 필요에 따라 Water Spray 와 Drain Valve 를동작시켜 Tank 내의 정상조건을 회복시킬수 있다. 그리고 만일 질소개스나 증기가 누설하여 Tank내 압력이 그 정상압력인 3 psig 를 초과하게되면 Tank 는 폐기물처리계통에 Vent 한다. Tank 의 개스는 수소와 산소의 누적량을 검출하기 위하여 정기적으로 분석하도록 되어있다.

다. 원자로 정지(Reactor Shutdown)

로정지는 원자로를 零出力(Zero-Power)의 온도와 압력으로 부터 냉기정지(Cold Shutdown)상태까지 가져오는 운전을 말한다. 원자로를 정지하기 전에 Chemical and Volume Control System 으로부터 붕산수(Boric Acid)를 노냉각재계통에 주입하여 노의

Cold Shutdown 에 소요되는 노냉각재의 불산농도까지 그 농도를 증가시킨다.

노냉각재계통을 냉각시키기 위하여 주북수기에로 의 증기 Bypass Control Valve 를 조정하여 필요한 냉각율을 유지시킨다. 이때 적어도 하나의 노냉각재순환 펌프를 운전하여 모든 일차폐회로를 균일하게 냉각시켜야 한다. 그리고 가압기내의 전열기를 끄고 노냉각재 순환펌프에 필요한 Suction Pressure 를 유지시키면서 가압기를 냉각시키기 위하여 Spray Flow-를 사용한다.

냉각재의 온도와 압력이 각각 약 380°F 와 350 psig 이하로되면 Residual Heat Removal System 을 기동하여 노냉각재 계통을 냉각시킨다. 그리고 냉각재온도가 약 160°F 로 냉각될때까지 노냉각재순환펌프를 단속적으로 운전한다. 이와 같이 냉각하는 동안 냉각재순환펌프에 Suction Pressure 를 유지하기에충분할 정도의 계통압력을 유지하기위하여 가열기의전열기를 사용한다.

다음에 냉각재의 온도가 160°F 에 도달하면 지금까지 운전하고 있던 한대의 냉각재순환펌프를 정지시킨다음 전열기를 끄고 Chemical and Volume Control System 의 보조 Spray Flow 를 주입시켜 가압기를 계속 냉각시킨다. 이리하여 가압기 온도가 212°F 에 도달할때 가압기는 이 보조 Spray Flow 에 의하여 물에 차게된다. 다음에 Spray Flow 를 정지시키고 가압기 배기공을 열어야한다. (다음호에 계속)