

계통기초-1

원자력계통기초 I (표준형)

원자력교육원

한국수력원자력(주)
원자력교육원

알 린

@ 한국수력원자력(주) 원자력교육원 2004

본 교재의 저작권은 전적으로 한국수력원자력(주) 원자력교육원에
있으므로 어떠한 경우라도 저작권자의 서면 승인 없이 복제하여
배포 할 수 없으며 상업적 용도로 사용할 수 없습니다.

원자력교육원

총 목 차

제1장	1차계통 개요	3
제2장	원자로계통	29
제3장	원자로 보조설비	100
제4장	원자로 안전설비	172
제5장	발전소 보호계통	255

원자력교육원

제1장 1차계통 개요

제1절 계통 개요	4
-----------------	---

원자력교육원

제1절 계통 개요

[학습목표]

1. 원자력발전소 1차계통이 어떤 계통들로 구성되어 있는 지 설명할 수 있다.
2. 원자로냉각재계통을 이해하고 설명할 수 있다.
3. 원자로 보조계통들을 이해하고 설명할 수 있다.
4. 공학적안전설비를 이해하고 설명할 수 있다.
5. 원자로제어 및 감시계통을 이해하고 설명할 수 있다.

1. 계통 개요

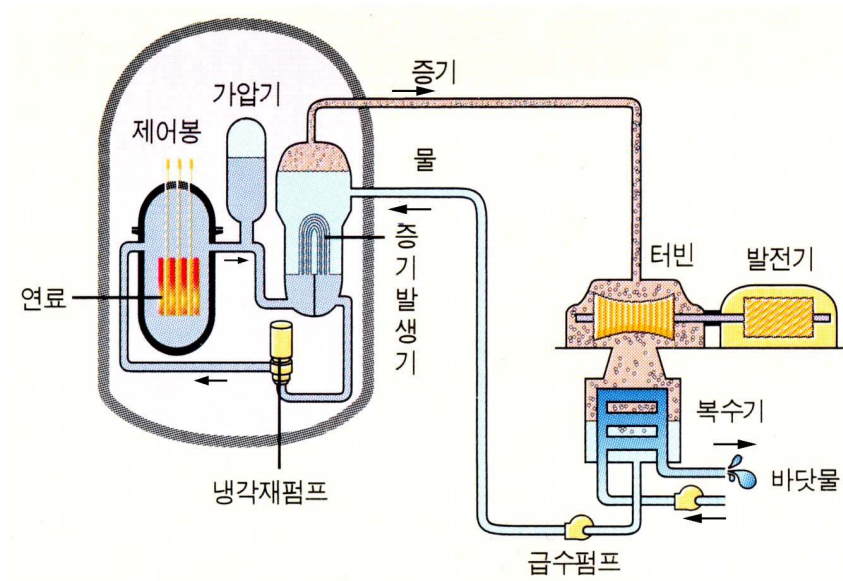
가압경수로형(PWR : Pressurized Water Reactor) 원자력발전소는 평균 2~5 % 정도의 저농축 우라늄(UO_2)을 핵연료로 사용하고, 1차계통인 원자로냉각재계통(RCS : Reactor Coolant System)은 폐회로로서 원자로냉각재펌프(RCP : Reactor Coolant Pump)에 의해 강제순환 된다.

2차측(Balance of Plant)의 비방사성 유체의 폐회로는 1차계통의 냉각수와 직접 접촉하지 않고 분리되어 있기 때문에 방사능을 띠지 않는다. 원자로냉각재로는 경수(H_2O)를 사용하며 감속재, 반사체 및 차폐체 역할을 겸하고 있다. 가압경수로형 원자력발전소의 전형적인 개략도는 [그림 1-1]과 같다.

냉각재인 물은 원자로용기(Reactor Vessel)를 통과하면서 핵분열로 발생한 열에 의해 가열되어 증기발생기(Steam Generator)로 이동하고 증기발생기의 U-튜브(Tube) 내부를 통과하면서 튜브 외부의 2차측 급수에 열을 전달하고 온도가 낮아진 냉각재는 원자로냉각재펌프에 의해 다시 원자로용기 입구측으로 되돌려진다.

원자로용기와 증기발생기 사이에 설치되어 있는 1대의 가압기(Pressurizer)에는 별도의 전열기 및 분무관이 있어 가압기 내의 증기를 일부 생성하거나 소멸함으로써 1차계통의 전체 압력($158\text{kg}/\text{cm}^2\text{A}$)을 유지 및 조절하는 역할을 한다. 따라서 가압기 내부의 온도는 $158\text{kg}/\text{cm}^2\text{A}$ 에 대한 포화온도이므로 원자로냉각재의 온도(약 327°C)보다 2

0℃ 정도 높은 편이다.



[그림 1-1] 가압경수로형 원자력발전소 개략도

2차측 터빈·발전기계통 역시 폐회로이며 방사능을 띠지 않는 탈염수(Demineralized Water)가 냉각수로 공급되어 1차측의 열에너지가 증기발생기의 튜브(Tube) 내부를 통해 2차측의 급수로 열전달이 이루어져 1차측 보다 낮은 압력상태에서 증기로 변하게 된다. 주급수펌프(Feed Water Pump)에 의하여 증기발생기로 공급된 물은 증기발생기 내부의 원자로냉각재가 흐르는 U자 형태의 관(U-Tube) 외벽을 통하여 열을 전달받아 증기로 변하게 된다. 이때 증기발생기 2차측의 압력은 정격 출력운전 중에 약 75kg/cm² 정도가 된다.

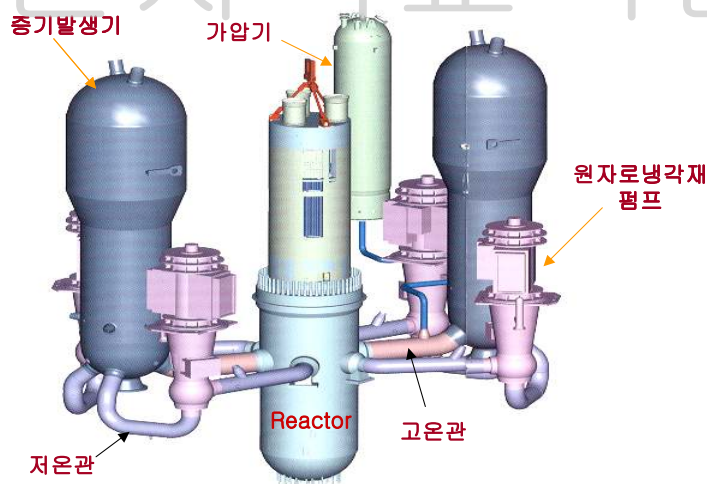
이런 과정을 거쳐서 증기발생기에서 생성된 증기는 터빈(Turbine)을 회전시키고 터빈과 같은 축에 연결되어 있는 발전기(Generator)에 의하여 전기에너지를 생산하게 된다. 또한 터빈에서 일을 하고 빠져나온 증기는 복수기(Condenser)로 유입되어 복수기를 통과하는 냉각수인 바닷물(혹은 강물)과 열 교환을 통해 응축되어 급수펌프로 증기발생기에 되돌려 진다.

원자력발전소의 1차계통은 원자로냉각재계통(RCS)을 중심으로 원자로보조설비가

있으며, 보조설비로서 화학 및 체적 제어계통, 화학 및 체적 제어 보조계통, 기기냉각수 계통, 기기냉각해수계통, 연료저장 및 취급계통과 방사성폐기물처리계통 등으로 구성된다. 원자로안전설비로서 격납건물계통, 격납건물살수계통, 비상노심냉각계통(ECCS), 보조급수계통 및 핵분열물질 제거 및 제어계통으로 구성되어 있다. 이와 함께 노내핵계측 계통, 노외핵계측계통, 제어봉제어계통과 원자로보호계통 등으로 구성되어 있다.

2. 원자로냉각재계통

원자로냉각재계통은 원자로에서 생성된 열을 고온관(Hot Leg)을 거쳐 증기발생기로 전달한다. 냉각재는 가압된 경수를 사용하며 감속재와 반사체의 역할 및 원자로 반응도 제어제인 붕산의 용매 역할을 동시에 수행한다. 원자로냉각재계통의 구성은 [그림 1-2]와 같이 폐유로와 가압장치로 되어있다. 두 개의 독립적인 1차 냉각유로로 구성되어 있으며, 각 유로는 두 대의 원자로냉각재펌프와 한대의 증기발생기, 내경 42인치(106.7cm)인 원자로냉각재 고온관과 내경 30인치(76.2cm)인 저온관(Cold Leg) 두 개로 구성되어 있다. 전기적으로 가열되는 가압기는 두 개의 유로 중 하나에 연결되어 있으며, 안전주입을 위한 배관은 네 개의 원자로냉각재 저온관 및 두 개의 고온관에 각각 연결되어 있다.



[그림 1-2] 원자로냉각재계통 개략도

가압된 물은 전동기 구동이며 단단(single-staged)인 원심형의 원자로냉각재펌프에 의해서 순환된다. 원자로로 유입된 냉각수는 원자로용기의 하향유로(Down Comer)를 통하여 노심으로 순환되며 노심을 통과한 후 증기발생기의 일체형 이코노마이저 부분의 수직 U자형 전열관 내부를 지나 다시 원자로로 순환된다. 이런 과정을 거치는 동안 증기발생기 2차측에서 생산된 포화증기는 터빈으로 전달되어 열출력을 전기출력으로 변환하게 된다.

가. 원자로(Reactor)

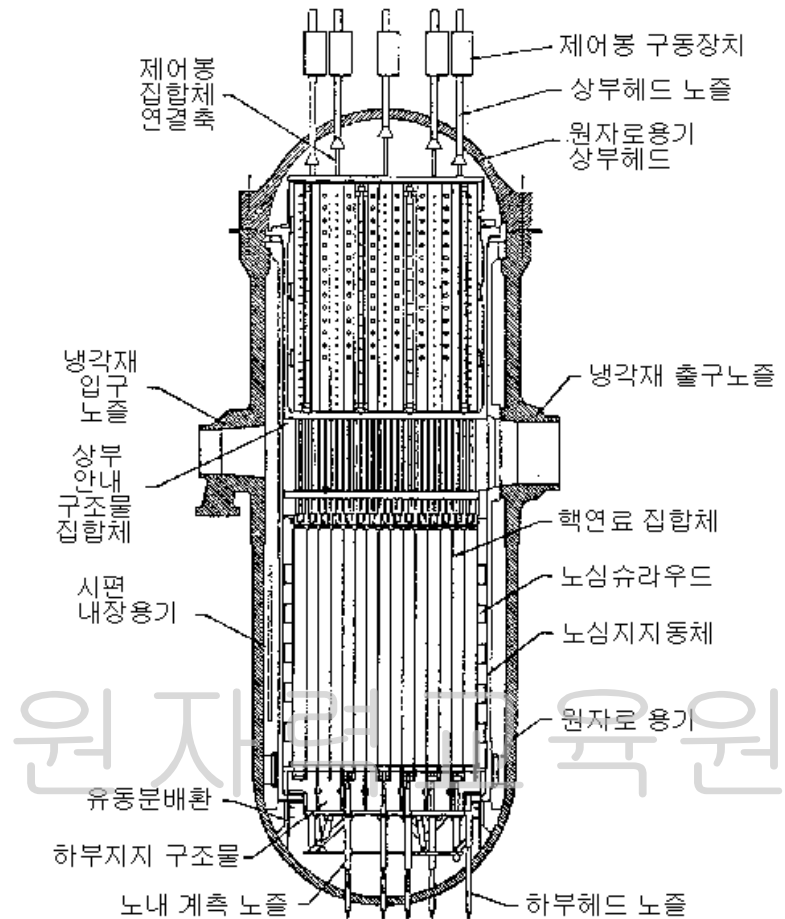
원자로는 원통형 용기에 반구형 하부헤드와 분리 가능한 상부헤드로 구성되어 있다. 원자로용기(Reactor Vessel)에는 핵연료집합체, 노심지지구조물, 제어봉집합체 및 기타 관련 설비가 내장되어 있으며 개략적인 것은 [그림 1-3]과 같다.

(1) 원자로용기(Reactor Vessel)

원자로용기의 재질은 탄소강이고 원자로냉각재와 직접 접촉하는 용기의 내부 표면은 부식을 방지하기 위하여 스테인레스강으로 피복되어 있다. 분리 가능한 원자로용기 상부헤드에는 플랜지가 있고 플랜지의 홈에는 속이 빈 2개의 오-링(O-Ring)이 설치되어 있어 압력식 밀봉장치 역할을 한다.

원자로심에는 이산화우라늄 펠렛들이 장전되는데, 이들 펠렛은 지르칼로이 튜브 내에 삽입되며 양 끝단은 봉단마개로 용접되어 있다. 튜브들은 집합체 형태로 조립되어 양단 고정체와 지지격자에 의해 각각 축방향과 반경방향으로의 움직임이 제한된다. 제어봉집합체는 니켈-크롬-철(Ni-Cr-Fe) 합금 피복재의 붕소탄화물(B_4C) 흡수봉과 니켈-크롬-철 합금으로 흡수강도가 약한 흡수봉으로 구성되어 있으며, 핵연료집합체에 있는 안내관에 의해 삽입 또는 인출이 유도된다. 노심은 초기에 4 그룹의 다른 U-235 농축도를 갖는 177개의 핵연료집합체로 구성되어 장입된다. 핵증기공급계통(NSSS)의 전체 열출력은 노심열출력 2,815MWth과 원자로냉각재펌프의 열출력을 포함하여 2,825MWth이다.

제어봉구동장치는 원자로용기 상부헤드 위에 설치되어 있다. 고정식 노내핵계측기집합체는 원자로용기 하부헤드를 관통하는 노내계측노즐을 통해 핵연료집합체 상부까지 연장되어 원자로출력 20%에서 100% 출력운전 중 출력분포를 측정한다.



[그림 1-3] 원자로 용기 및 내부구조물

(2) 원자로 내부 구조물

원자로 내부 구조물은 크게 노심지지동체(Core Support Barrel)와 상부 안내 구조물 집합체의 두부분으로 구성되어 있다. 유동배분환(Flow skirt)이 냉각재 유로를 구성하는 부분으로서 기능을 하지만 원자로 내부 구조물과는 분리되어 있고 원자로용기의 하부헤드(Bottom Head)에 고정되어 있다.

(가) 노심지지동체 집합체

원자로 내부 구조물의 주 구조재는 노심지지동체 집합체이다. 노심지지동체 집합체는 노심지지동체, 하부지지구조물/계측기노즐 집합체, 그리고 노심 슈라우드(Shroud)로 구성되어 있다. 집합체의 재질은 오스테나이트 스테인레스강이다.

노심지지동체 집합체는 노심지지동체 상단의 상부플랜지가 원자로용기 턱(ledge)에 놓여 지지된다. 원자로용기와 원자로 내부 구조물은 노심지지동체의 플랜지에 부착된 4개의 등간격 키(Key)에 의해 정렬되는데, 등간격 키는 원자로용기 턱과 상부덮개(Closure Head) 내의 키홈에 삽입된다. 노심지지동체 하부플랜지는 하부지지구조물을 지지, 고정 및 정위치시킨다. 하부지지구조물은 서포트 빔(Support Beam)을 통하여 하중을 노심지지동체 하부플랜지로 전달함으로써 노심을 지지한다. 빔의 위치핀(Locating Pin)들은 핵연료집합체 하단의 위치를 잡아준다. 노심 슈라우드는 냉각재 유로의 경계를 형성한다. 핵연료집합체는 하부지지구조물에 의해 지지되고 고정된다. 노심지지동체의 하단부는 원자로용기와 접촉되는 6개의 완충기에 의해 과도한 반경방향 비틀림 운동이 제한된다.

(나) 상부안내구조물 집합체

상부안내구조물 집합체는 핵연료집합체의 상단을 정렬하고 횡방향으로 지지하며, 제어봉 간격을 유지하는 역할을 한다. 또한 운전중 핵연료집합체를 상부에서 눌러주어 중대사고시 핵연료집합체가 정위치로부터 들어 올려지는 것을 방지하며 상부 영역에서 냉각재 횡방향 유동의 영향으로부터 제어봉을 보호한다. 원자로 내부구조물의 설치 및 핵연료재장전시 상부안내구조물 집합체는 하나의 구조물로 취급된다.

상부안내구조물 집합체는 상부안내구조물 지지동체 집합체, 제어봉집합체 슈라우드 및 안내구조물 지지계통으로 구성된다.

(다) 유동배분환

인코넬 유동배분환은 구멍(Hole)을 가진 짧은 수직원통으로서, 2개의 보강 링으로 보강되어 있다. 유동배분환은 노심입구에서 유동분포의 불균형을 줄이고 원자로 용기 하부에서 와류의 발생을 방지하기 위해 사용된다. 유동배분환은 원자로용기의 하부헤드에 용접되는 9개의 등간격 지지구조물에 의해 지지된다.

(라) 원자로냉각재의 흐름

원자로냉각재는 다음과 같은 순서에 의하여 유로를 형성한다.

- 입구 노즐
- 노심통과 원자로용기 사이의 환형공간
- 유동배분환
- 하부 공동
- 노심(연료집합체)
- 상부안내구조물
- 출구 노즐

나. 제어봉 구동장치(Control Element Drive Mechanisms)

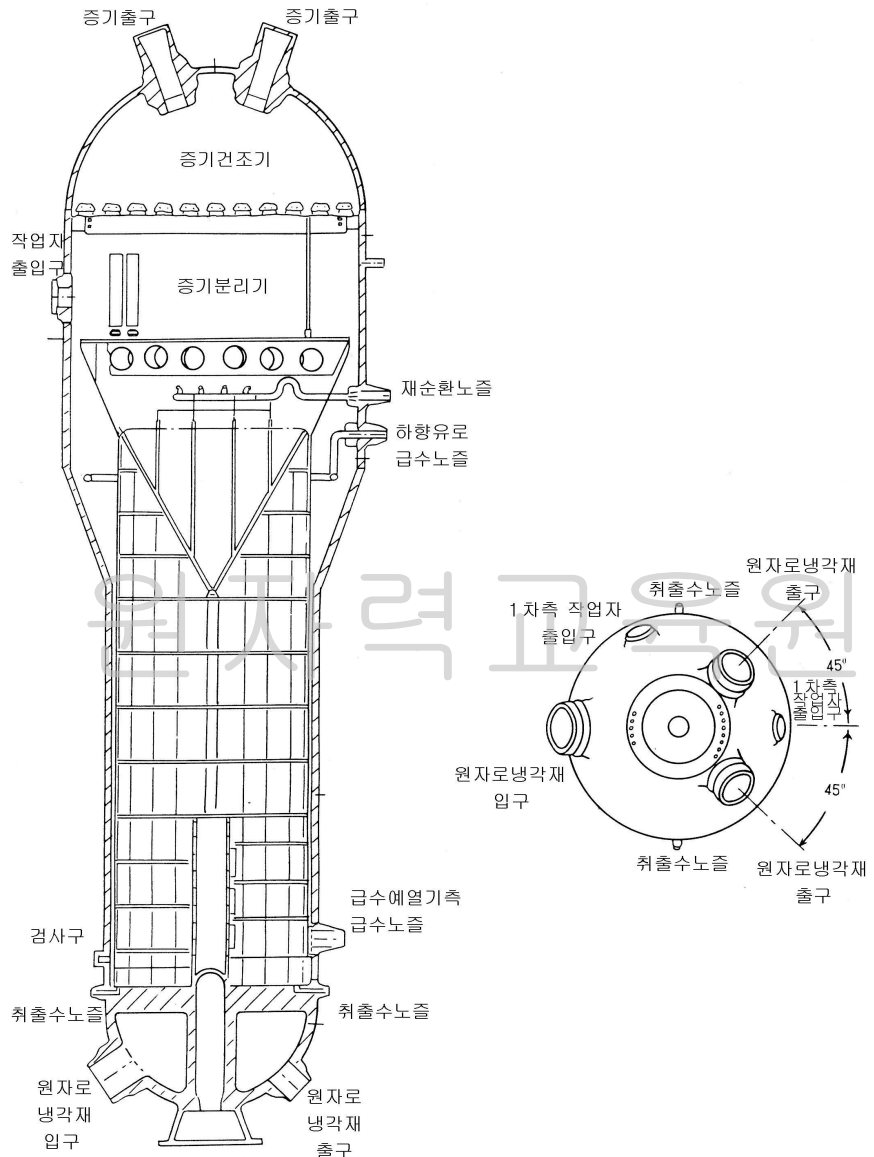
제어봉집합체는 2가지 유형으로서, 12개봉(12 Finger) 구조의 전강(Full Strength)용 제어봉집합체가 32개, 4개봉(4 Finger) 구조의 제어봉집합체 41개, 총 73개의 제어봉집합체가 있다. 12개봉 제어봉집합체 32개 중 28개는 정지그룹에 속해 있고, 나머지 4개는 조절그룹에 속해 있다. 또한 4개봉 구조의 제어봉집합체 중 전강도 용 33개는 조절그룹에 속해 있고, 부분강제어봉 8개는 부분강 제어그룹에 속해 있다. 제어봉집합체는 원자로용기 상부헤드에 장착되어 있고 전자기적 힘에 의해 움직이는 제어봉 구동장치에 의해 삽입 또는 인출되는데 제어봉집합체는 각각 독립적으로 구동 장치에 연결되어 있다.

발전소 정상운전 중 제어봉 구동장치는 노심에서 인출된 제어봉을 현 위치에 유지하는 기능을 수행하며, 자동 또는 수동 상태로 운전된다. 원자로가 정지(Trip) 되거나 고장으로 인하여 전원이 상실될 경우 제어봉은 즉시 중력에 의해 노심 내로 삽입된다.

다. 증기발생기(Steam Generator)

가압경수로형 원자력발전소는 원자로를 중심으로 한 1차측과 터빈-발전기를 중심으로 하는 2차측으로 분리되어 있다. 그러나 원자로 내 노심을 거친 고온의 냉각재는 터빈을 회전시킬 수 있는 증기를 생성하여야 한다. 이 2개의 회로를 연결해 주는 장치가 증기발생기(Steam Generator)이다. 한국표준형원전에서 증기발생기는 원자로냉

각재계통의 2개 유로(Loop)에 각각 한대씩 모두 2대가 설치되어 있다. 증기발생기는 증발기 부분과 증기드럼 부분으로 구분할 수 있다. 증발기 부분은 U-튜브 열교환기로 구성되고, 증기드럼 부분은 습분분리장치로 이루어져 있으며 증발기 부분의 상부에 위치하며 개략적인 것은 [그림 1-4]와 같다.



[그림 1-4] 증기발생기 구조

- (1) 증기발생기 1차측 헤드에 수직분리판이 설치되어 입구/출구 공동부를 분리하고 있어 원자로냉각재는 원자로용기 고온관으로부터 증기발생기 1차측 헤드에 설치된 입구노즐로 유입되어 U-튜브를 통과하면서 2차측 급수에 열전달을 한 후 증기발생기 출구노즐을 거쳐 원자로냉각재펌프에 의해 원자로 용기로 보내진다.
- (2) 2차측 급수는 증기발생기 상부로 공급되는 하향유로와 하부로 유입되는 예열급수로 구분된다. 상부로 공급되는 하향유로는 하향통로를 통하여 U-튜브 외측으로 흘러 일차측 예열영역에서 예열급수와 혼합되어 과냉상태의 증기가 생성되며 습분분리기를 통과하면서 99.75 % 이상의 건포화 증기로 변환되어 터빈에 공급된다. 증기발생기 출구노즐에 벤츄리 노즐 형태인 유량제한기가 설치되어 주증기관 파열과 같은 바람직하지 못한 사고 발생시 증기의 방출을 제한하여 격납용기 내 압력과 온도를 제한한다.

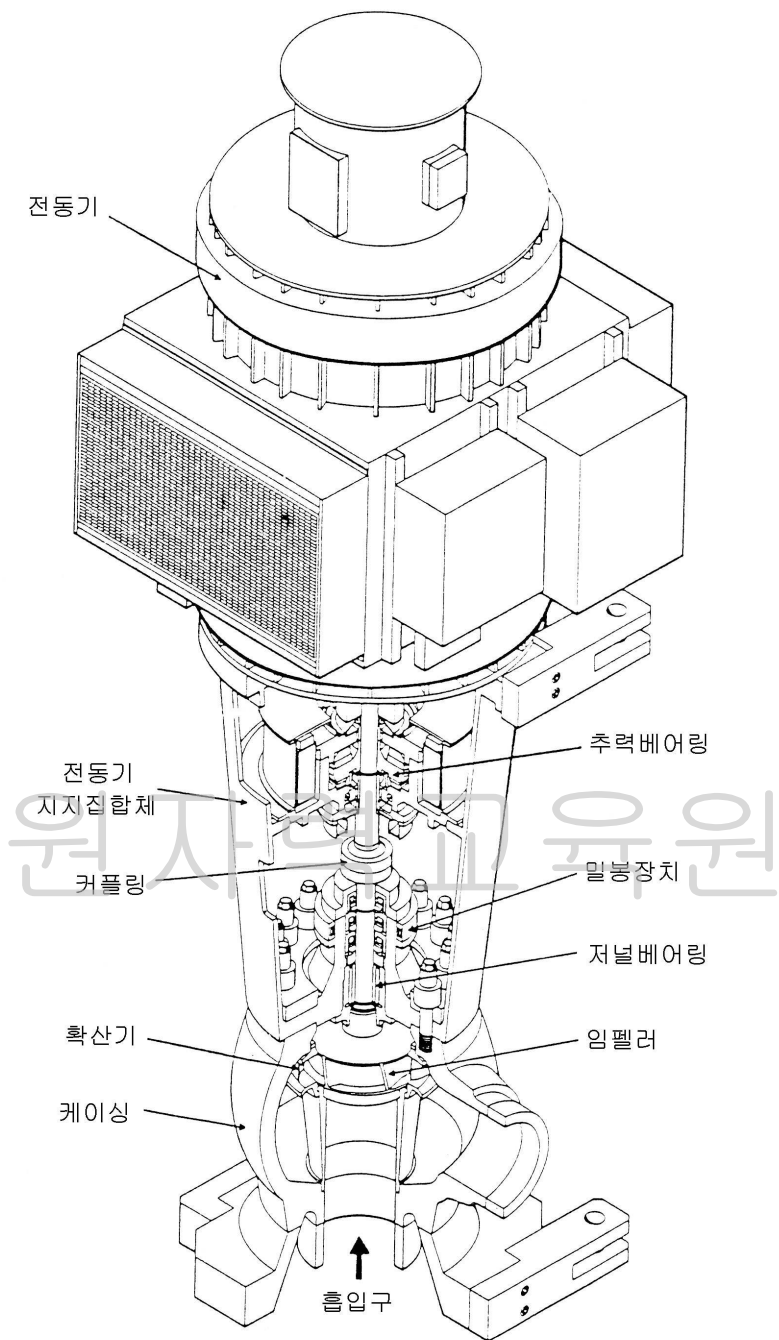
라. 원자로냉각재펌프(Reactor Coolant Pump)

원자로냉각재 유로에는 고온, 고압 하에서 많은 양의 원자로냉각재를 이송할 수 있도록 설계된 원자로냉각재펌프가 있다. 이 펌프는 발전소 운전 중 노심에서 생성된 열을 적절히 제거할 수 있도록 충분한 강제순환 유량을 제공한다. 하나의 유로(Loop)에는 2개의 저온관이 있으며 각각 한 대씩 설치되어 원자로냉각재계통에는 모두 4대의 원자로냉각재펌프가 있다.

또한 발전소 기동시에는 원자로냉각재펌프의 운전에 따른 마찰열을 이용하여 원자로냉각재를 가열한다. 펌프에 설치된 관성바퀴(Fly-wheel)는 전동기의 전원상실시 원자로냉각재펌프의 감속시간을 연장시켜 노심냉각에 기여한다. 개략적인 구조는 [그림 1-5]와 같다.

(1) 주요 구성기기

원자로냉각재펌프는 수력학적 부분(펌프), 축밀봉 장치와 모터(Motor) 부분으로 구성되어 있다.



[그림 1-5] 원자로냉각재펌프

(가) 수력학적 부분

원자로냉각재는 펌프측 하부에 부착된 임펠러(Impeller)에 의하여 이송된다. 원자로냉각재는 펌프 케이싱(Pump Casing)의 하부로 들어와 임펠러를 거쳐 케이싱 측면에 있는 확산기를 통하여 노즐로 방출된다.

(나) 축밀봉 장치

한국표준형원전의 원자로냉각재펌프는 기계식 밀봉(Mechanical Seal)을 채택하고 있으며, 이는 고정자(텅스텐 카바이드)와 회전자(탄소)의 접촉에 의한 밀봉방식을 채택하고 있다.

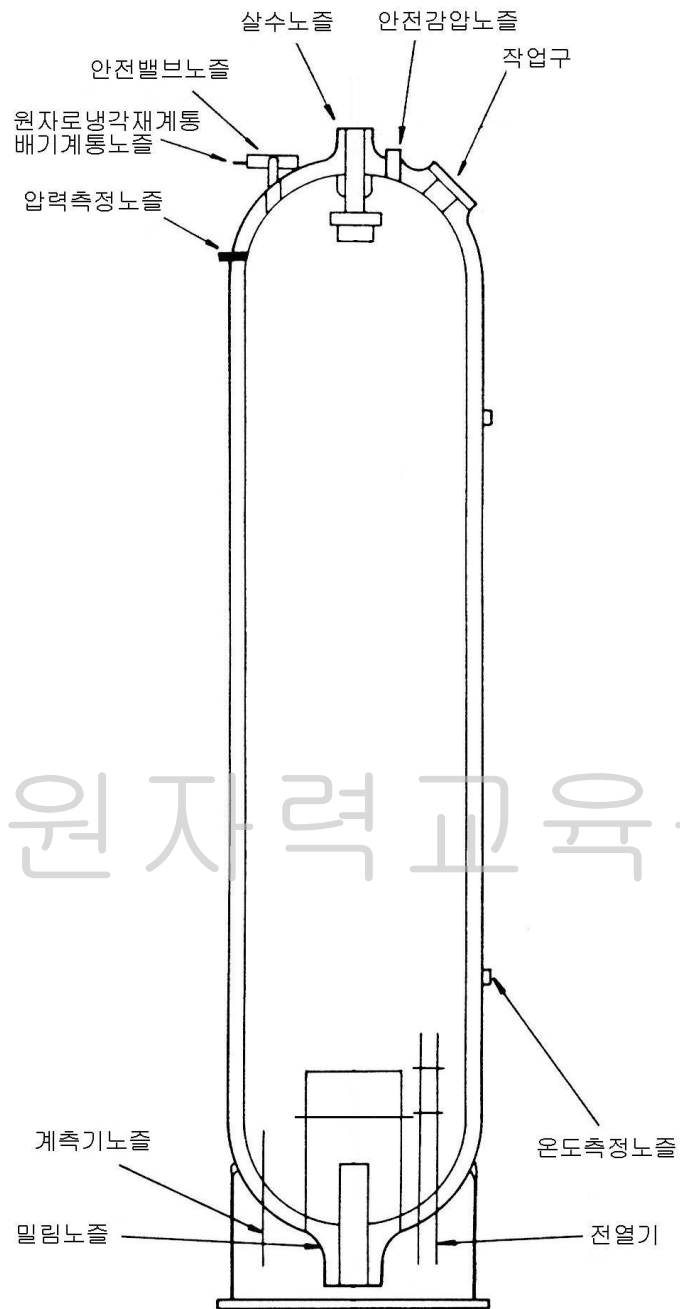
(다) 모터

모터는 수직, 단일속도, 공랭식, 3상 유도전동기 모터로서 회전자와 고정자는 일반 모터의 설계와 동일하다. 역회전 방지장치가 부착되어 있어 계통 내의 다른 펌프가 운전 중일 때 정지된 펌프가 역회전하는 것을 방지한다. 모터에 있는 관성바퀴는 총 회전 관성을 증가시켜 펌프의 연장운전을 가능하게 하고, 이것은 펌프에 공급되는 전원상실시 원자로 노심에 냉각수 공급을 연장하는 기능을 수행한다.

마. 가압기(Pressurizer)

가압기는 원자로냉각재계통의 고온관 중 하나에 밀림관(Surge Line)으로 연결되어 있다. 가압기는 원자로냉각재의 완충탱크 역할을 하며, 정상운전 중 원자로냉각재의 팽창 및 수축 공간을 제공하고, 압력을 일정하게 유지하며 과도상태(Transient State)시 압력변화를 수용한다. 정상운전 중 가압기의 체적은 각각 50%의 물과 증기가 공존하고 있으며, 증기-물 평형은 살수노즐(Spray Nozzle)과 침수형 전열기에 의해 유지된다.

가압기 상부에는 안전밸브 3개가 설치되어 계통이 설계압력 이상으로 상승하는 것을 방지하며, 하부에는 36개의 교체 가능한 직접 접촉식 침수형 전열기가 수직으로 설치되어 가압기 내의 냉각재 온도를 일정범위 이내로 유지시키며 개략적인 구조는 [그림 1-6]과 같다.



[그림 1-6] 가압기 구조

3. 원자로 보조계통

가. 화학 및 체적 제어계통

화학 및 체적 제어계통은 원자로냉각재의 순도, 체적 및 붕소농도를 조절한다. 냉각재 일부를 추출하여 연속적으로 정화함으로써 원자로냉각재계통의 냉각재 순도를 조절한다. 원자로냉각재계통에서 유출된 냉각재는 재생열교환기에서 냉각된 다음 유출수열교환기를 지나 부식 및 핵분열생성물을 제거하기 위해 필터와 탈염기를 통과한다. 그 후 냉각재는 체적제어탱크 상부에서 분사(Spray)되어 유출수 중에 함유된 불응축성 개스 등을 분리시킨다. 충전펌프에 의해 원자로냉각재계통으로 다시 주입되기 전에 예열시키는 재생열교환기로 보내진다.

화학 및 체적 제어계통은 가압기의 프로그램된 수위를 유지하기 위하여 원자로 냉각재의 양을 자동으로 조절한다. 수위 프로그램은 원자로냉각재 온도변화에 따른 비체적의 변화와 원자로냉각재펌프 조절밀봉 누설을 보상한다.

화학 및 체적 제어계통은 정화된 유출수를 붕산회수계통으로 방출하고 농축붕산수나 탈염수를 충전펌프로 주입하는 “주입 및 방출” 방법에 의해 원자로냉각재 붕소농도를 조절한다. 방출되는 냉각재는 이온교환과 탈기과정을 거쳐 붕산수 농축기로 보내진다. 붕산수 농축기의 농축수는 붕산수로 재사용하기 위해 핵연료재장전수탱크로 보내지고, 증류액은 먼저 이온교환기를 통과한 후 탈염수로 재사용하기 위해 원자로보충수탱크로 보내진다. 또한 핵연료재장전수탱크는 안전주입계통과 격납건물살수계통의 붕산수원으로 사용된다.

나. 정지냉각계통(SCS : Shutdown Cooling System)

정지냉각계통은 원자로냉각재 온도를 177℃(350°F)에서 재장전 온도인 약 52℃(125°F)까지 제어된 냉각수로 감소시키고, 재장전 기간 중 원자로냉각재 온도를 적절하게 유지시키기 위하여 사용된다. 이 계통은 2대의 정지냉각열교환기를 통하여 원자로냉각재를 순환시켜 원자로냉각재계통으로 되돌려 보내기 위해 저압안전주입펌프를 사용한다. 기기냉각수계통은 정지냉각열교환기에 냉각수를 공급한다.

다. 기기냉각수계통

기기냉각수계통은 원자로의 여러 보조계통에 냉각수를 공급하며 관련 기기로부터 열을 제거한다. 또한 기기냉각수계통은 기기냉각해수계통과 방사능에 오염될 수 있는 계통 사이에 중간방벽 역할을 함으로써 방사능에 오염된 물이 해수로 누출될 가능성을 줄인다.

라. 기기냉각해수계통

기기냉각해수계통은 기기냉각수열교환기에 최종 열제거원인 해수(海水)를 공급한다. 기기냉각해수계통은 두 개의 독립된 계열로 구성되어 있으며 각 계열은 펌프 및 관련 배관으로 구성되어 있다. 한 계열에 의해 가상 설계기준사고 하에서 발전소 안전정지에 필요한 충분한 냉각해수가 공급될 수 있도록 설계되었다.

마. 연료취급 및 저장계통

핵연료의 재장전은 사용후연료를 원자로용기로부터 인출하여 사용후연료저장조로 이송하고 신연료를 원자로에 재장전 하는 일련의 공정을 말한다. 사용후연료의 수중이송은 방사선 차폐효과와 붕괴열의 제거를 위한 신뢰성 있는 냉각효과를 제공한다.

핵연료 취급작업은 재장전시 냉각수가 채워지는 격납건물재장전수조, 사용후연료저장조 및 이와 연결된 핵연료이송수로의 두 구역에서 수행된다. 격납건물재장전수조와 핵연료건물이송수로는 핵연료이송관으로 연결되어 있다.

사용후연료는 핵연료재장전 중에 원자로용기로부터 인출되어 핵연료이송계통에 의하여 옮겨진다. 이후 격납건물로부터 핵연료이송관을 통해 핵연료건물의 핵연료이송수로(Transfer Canal)로 이송된다. 사용후연료는 핵연료이송수로에서 핵연료이송계통으로부터 분리되어 사용후연료저장조 내에 설치된 저장대에 보관된다. 적당한 붕괴기간이 지난 사용후연료는 사용후연료저장조로부터 중간 또는 영구 저장시설로의 수송을 위해 사용후연료 캐스크(Cask)에 적재되어 이송될 수 있다.

신연료는 핵연료건물의 신연료저장고 내에 설치된 수직형 저장대에 저장된다. 저장용량은 최소한 1회분의 교체량을 수용하도록 설계되어 있다.

사용후연료저장조는 스테인레스강 라이너플레이트가 장착된 콘크리트구조물로서 그 저장용량은 10년 분의 사용후연료와 1회의 전노심제거분을 합한 양을 수용한다. 사

용후연료집합체는 붕소가 함유되지 않은 냉각수에서도 임계상태에 도달하지 않도록 설계된 수직형 저장대에 보관된다. 정상운전 중에 사용후연료저장조의 수온조절은 기 냉각수계통에 의해 냉각되는 열교환기로 저장수를 순환시켜 냉각된다. 저장조 냉각수의 정화 및 정제는 필터, 여과기 및 이온교환기에 의해 수행된다.

핵연료취급계통은 핵연료집합체를 안전하게 취급할 수 있게 하고 요구되는 조립 및 분해작업과 원자로용기 상부구조물 및 내부구조물의 보관작업을 할 수 있다.

바. 방사성폐기물처리계통

방사성폐기물처리계통은 방사능 및 방사성 오염 가능성이 있는 액체, 기체, 고체 폐기물을 안전하게 처리하도록 설계되었으며, 다음과 같은 3개의 주요계통으로 구성되어 있다.

(1) 액체방사성폐기물처리계통

액체방사성폐기물처리계통은 방사성 액체 및 화학폐기물을 규제기준과 ALARA (합리적으로 달성 가능한 한 낮은) 기준에 적합하게 처리할 수 있도록 설계되어 있다. 또한 폐액을 충분히 처리함으로써 발전소 용수로 재사용 가능하도록 설계하였다. 액체 방사성폐기물을 가장 적절하게 처리하기 위해 용존 및 부유 고체를 기준으로 수집 및 분류한다. 저용존 고형물을 함유하고 있는 액체방사성폐기물은 여과기 및 이온교환기로 처리하며, 고용존 고형물을 함유하고 있는 액체방사성폐기물은 여과기 및 증발기로 처리한다. 증발기 처리시 발생하는 응축수는 저용존 고형물을 함유하는 액체 방사성폐기물과 함께 이온교환기로 처리한다. 이온교환기로 처리된 액체는 원자로보충수탱크 또는 응축수저장탱크로 재순환되거나, 방사능 정도를 검사(Check) 후 방출기준을 만족하면 바다로 배출된다.

(2) 기체방사성폐기물처리계통

기체방사성폐기물처리계통은 원자로냉각재로부터 방출되는 수소를 주로 함유한 고방사성기체를 처리하도록 설계되어 있다. 방사성기체는 모관에 수집되어, 수분을 제거한 후 방사능 붕괴기간 동안 활성탄지연대에 흡착된다. 활성탄지연대에서 충분히 붕괴과정을 거친 방사성기체는 적절한 여과처리 및 방사능에 대한 감시를 한 후 발전소공기조화계통을 거쳐 소외로 방출된다.

(3) 고체방사성폐기물처리계통

고체방사성폐기물처리계통은 슬러지, 농축폐액 및 기타 고체폐기물들을 운송하거나 처분할 수 있도록 설계되어 있으며, 이들 폐기물에는 폐수지, 탱크 바닥 찌꺼기, 화학 및 체적 제어계통 농축기와 액체방사성폐기물처리계통의 증발기로부터 발생한 농축폐액, 폐여과기, 기타 오염된 잡고체 폐기물 등이 포함된다. 농축폐액은 운송, 처분 및 부피를 최소화하기 위해 건조처리 한다. 농축폐액의 건조분말 및 기타 습식폐기물은 처분을 위해 적절한 고형화 물질 및 고화제와 섞어 폐기물드럼에 넣어 포장되며, 기타 저방사성 잡고체 폐기물들은 드럼에 넣어 압축포장 된다.

4. 공학적안전설비

공학적안전설비는 원자로냉각재상실사고(LOCA) 등과 같은 예상치 않은 방사성핵분열물질이 원자로냉각재계통으로부터 방출되는 설계기준사고시(DBA) 그 기능이 발휘된다. 이들 안전설비는 이러한 사고시에 10CFR100에서 요구하는 방사선준위 이하로 유지시킬 수 있도록 사고를 국소화, 통제, 완화 또는 종결시키는 역할을 한다. 이러한 역할을 충실히 수행하기 위하여 감시변수가 보호작동이 요구되는 상태에 도달하면 격납건물격리신호, 격납건물살수신호, 주중기격리신호, 안전주입작동신호, 재순환작동신호 및 보조급수공급신호 등을 발생시킨다.

가. 격납건물계통

격납건물계통은 격납건물, 격납건물열제거계통, 격납건물격리계통, 격납건물가연성기체제어계통 등으로 구성되어 있다.

(1) 격납건물

격납건물은 원통형 벽체와 반구형 돔 및 원형의 전면 기초로 구성되며, 원통형 벽체와 반구형 돔은 수평방향 및 역 U자 형태의 수직방향 텐돈(Tendon)으로 구성되는 포스트텐션(Post-Tension) 방식에 의해 양 방향으로 프리스트레스트 방식으로 건설된다. 격납건물 내부는 기밀성 유지를 위해 라이너 플레이트로 피복 되어 있다. 기초의 상부에는 콘크리트 바닥 보호 슬랩(Slab)이 설치된다. 격납건물의 외벽 콘크리트는 정상운전 및 발전소 사고시 생물학적 차폐역할을 한다.

격납건물은 원자로 및 원자로냉각재계를 비롯한 1차측 주요 계통을 완벽하게 둘러싸고 있으며, 발생 가능성이 희박한 냉각재상실사고시에도 주변 환경으로의 방사성물질의 누출량이 사고 후 24시간 이내에는 원자로격납건물 총 자유체적(Total Containment Free Volume)의 0.2%, 24시간 이후에는 0.1%를 각각 초과하지 않도록 설계되어 있다. 내부구조물은 기기의 비산물에 대한 방호역할을 하며 보수작업원에 대한 생물학적 차폐역할을 한다.

(2) 격납건물살수계통(열제거계통)

격납건물살수계통은 설계기준사고 발생시 격납건물 대기로 살수용액을 공급하여 핵분열생성물, 특히 요오드(Iodine) 원소들을 제거함으로써 발전소 외부로의 방사능 누출을 최소화시키고 동시에 안전주입 모드와 재순환 모드 운전 중 격납건물 대기의 온도와 압력을 감소시키는 기능을 한다. 또한 격납건물살수계통은 재순환 모드 운전중 격납건물 대기로부터 열을 제거하며, 설계기준사고 발생시 가연성기체들의 국부적 축적을 방지하기 위하여 격납건물 대기를 최대한 혼합시키는 기능을 한다.

격납건물살수계통은 100% 용량을 가진 2개의 계열로 이루어지며, 각 계열은 한 대씩의 펌프와 열교환기 및 살수모관과 살수노즐로 구성되어 있다. 격납건물살수펌프의 유입원은 초기 안전주입 모드에서는 핵연료재장전수저장탱크, 재순환 모드에서는 격납건물 재순환 집수조가 된다.

(3) 격납건물격리계통

핵중기공급설비로부터 제공되는 격납건물격리신호를 받아 작동되며, 설계기준사고시 격납건물관통부의 격리밸브를 폐쇄시킴으로써 환경으로의 방사능 누출을 설계기준 이하로 유지시킨다. 또한 격납건물격리계통은 격납건물 내에서의 핵연료 낙하사고시에 격납건물을 격리시킨다.

(4) 격납건물 가연성기체 제어계통

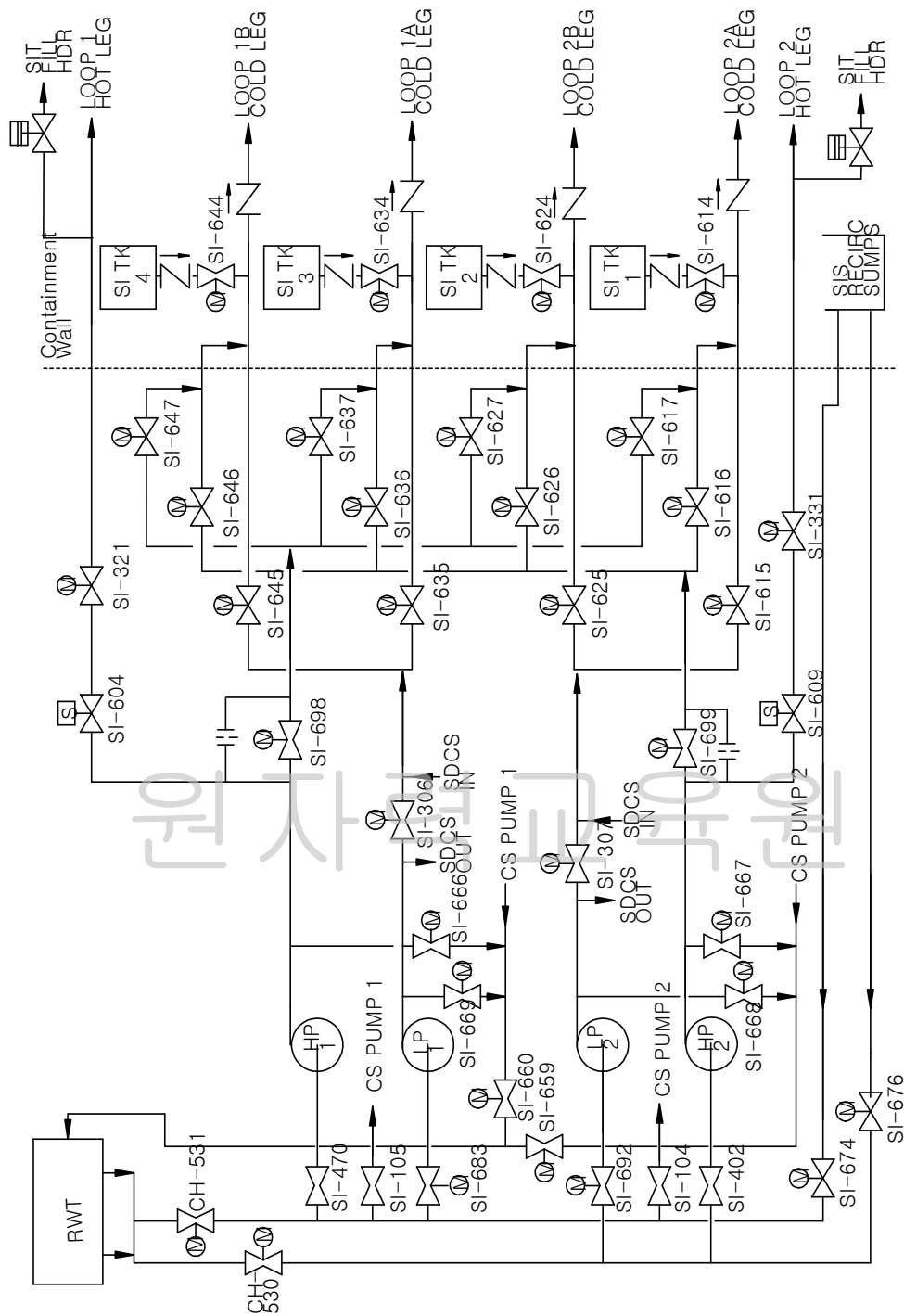
가상 설계기준사고 후 격납건물 내에는 지르코늄과 물과의 반응, 건설자재의 부식, 노심과 배수조 내 수용액의 방사화에 의해 수소기체가 생성된다. 이 가연성기체를 제어하기 위해 수소재결합기계통, 수소감시계통, 수소혼합계통 및 퍼지계통으로 이루어져 있다.

격납건물퍼지계통은 대용적 퍼지계통, 소용적 퍼지계통 및 원자로냉각재상실사고 후 퍼지계통으로 구성된다. 대용적 퍼지계통은 핵연료재장전 작업 중 격납건물의 대기정화를 위하여 사용하고, 소용적 퍼지계통은 발전소의 정상운전 및 정지기간 동안 격납건물의 대기정화를 위하여 사용하는 계통이다. 원자로냉각재상실사고 후 퍼지계통은 사고 후 정화기능을 보조하기 위하여 원자로냉각재상실사고 후에 운전하여 격납건물 대기의 가소성기체를 제거할 수 있다.

나. 안전주입계통

안전주입계통의 목적은 원자로냉각재계통에 사고가 발생하여 압력이 낮아질 때 노심을 냉각하는 수단으로 사용된다. 냉각재상실사고, 주증기관파열사고, 주급수관파열사고와 증기발생기관파열사고 등이 발생하였을 때 안전주입이 일어날 수 있다.

안전주입계통은 능동적으로 작동하는 고압안전주입계통과 저압안전주입계통이 있고, 수동적으로 작동하는 안전주입탱크로 구성되어 있다. 개략적인 구성은 [그림 1-7]과 같다. 동작초기 이들 계통은 봉산수원을 핵연료재장전수탱크(RWT)로부터 취하는데 핵연료재장전수탱크의 수위가 감소하여 재순환작동신호(RAS)가 발생하면 저압안전주입계통은 자동정지하여 고압안전주입계통만이 안전주입기능을 수행하게 된다. 수동부인 안전주입탱크는 각 냉각재계통의 저온관(4개)에 연결되어 냉각재계통 압력이 탱크압력(질소 압력) 이하로 감소하면 탱크 내의 봉산수는 압력차이에 의해 자동으로 주입된다. 정상시 안전주입탱크는 질소에 의해 약 42kg/cm^2 의 압력으로 가압되어 있다.



[그림 1-7] 안전주입계통 개략도

다. 보조급수계통

급수계통이 운전되지 않고 원자로냉각재 온도가 177℃(350°F) 이상이면 보조급수계통이 증기발생기의 2차측에 급수를 공급한다. 이 계통은 2대의 전동기구동펌프(1E 급)와 2대의 터빈구동펌프로 구성되어 있다. 발전소 비상냉각시 보조급수계통은 원자로냉각재계통으로부터 붕괴열(Decay Heat)과 현열(Residual Heat)을 제거하기 위해 증기발생기에 급수를 공급할 수 있도록 설계되어 있다.

전동기구동 및 터빈구동 보조급수펌프는 보조급수작동신호나 다중보호계통으로부터의 신호에 의해 관련 증기발생기에 급수를 공급할 수 있도록 자동 기동된다.

라. 핵분열생성물 제거 및 제어계통

(1) 주제어실 비상보충계통

이 계통은 주제어실 공기조화계통의 일부이며 냉각재상실사고시 주제어실 공기조화계통으로 공급되는 보충 외기(대기)에 포함된 요오드와 입자들을 정화하는데 사용된다.

(2) 비상노심냉각계통 기기실배기계통

이 계통은 비상노심냉각계통 기기실공기조화계통의 일부이며, 이 계통은 설계기준사고 후 비상노심냉각계통 기기실들로부터 배기되는 공기에 포함될 수 있는 요오드와 입자들을 여과하기 위하여 사용된다.

(3) 핵연료건물 비상배기계통

이 계통은 핵연료건물공기조화계통의 일부이며 핵연료취급사고 후 핵연료건물로부터 배기 되는 공기에 함유될 수 있는 요오드와 입자들의 농도를 줄이기 위하여 사용된다.

5. 원자로제어 및 감시계통

가. 원자로제어계통

원자로제어계통은 원자로의 기동과 정지를 위해 사용되며, 터빈부하 요구에 따라 원자로출력 조절을 위해 사용된다. 원자로출력의 15%와 100% 영역에서 최대 분당

5%의 선형부하변동 및 10%의 단계부하변동을 감당할 수 있다. 이러한 제어는 일반적으로 원자로냉각재 온도의 변화에 대응하여 제어봉집합체의 위치가 자동으로 조절됨으로써 이루어진다. 정상운전시 제어봉제어는 자동제어를 우선하여 수동제어가 가능하도록 설계되어 있다. 만약 원자로냉각재 온도가 프로그램된 값과 편차가 발생하면 제어봉은 그 차이가 해소될 때까지 조절된다. 원자로냉각재 온도 조절은 설정된 프로그램에 따라 주증기 압력을 운전제한치 이내로 유지하고 원자로출력을 부하요구에 일치되게 한다.

원자로는 제어봉집합체의 움직임 및 원자로냉각재 내에 용해된 붕산과의 조합으로 제어되고, 붕산농도는 냉각재온도의 변화, 지온농도와 핵연료연소에 따른 반응도 변화를 위해 사용된다. 붕산의 첨가는 초기 연료장전과 연료재장전시 정지여유도를 증가시킨다. 붕산은 침전이 일어나지 않는 적절한 온도에서 준비되고 저장된다. 제어봉집합체는 원자로를 정지시키거나 출력을 변경시키기 위한 신속한 반응도 변화를 위해 사용한다. 제어봉집합체는 원자로용기 상부에 설치된 제어봉구동장치에 의해 구동되며, 원자로보호신호 작동시 제어봉집합체가 중력에 의해 원자로 노심으로 신속하게 삽입될 수 있도록 설계되어 있다.

원자로냉각재계통의 압력제어는 증기와 물이 열평형 상태에 있는 가압기에 의하여 조절된다. 가압기 내의 증기는 원자로냉각재의 온도변화에 의한 냉각재의 팽창 또는 수축에 따른 체적변화와 압력변화를 수용하고 요구되는 압력을 유지하기 위하여 가압기 살수와 가압기 전열기를 운전하여 제어한다.

원자로냉각재의 과압에 대한 보호는 가압기에 연결된 안전밸브에 의하여 수행되며, 동작된 안전밸브로부터 방출되는 증기는 원자로배수탱크의 물 속으로 방출되어 냉각되고 응축된다. 원자로배수탱크에 대한 과압보호는 원자로냉각재를 격납건물배수조로 내보내는 파열판의 파열에 의해 보호된다.

증기우회제어계통은 원자로출력과 터빈출력 사이의 출력편차가 큰 경우, 이차측 증기를 배출하기 위해서 사용된다. 이것은 원자로가 정지하지 않고 출력평형을 유지하도록 한다. 각 증기발생기의 수위는 급수제어계통에 의해 유지된다. 원자로출력감발계통은 대용량의 부하상실시 원자로출력을 신속히 감발시키기 위해 선택된 제어봉집합

체를 노심으로 삽입하기 위하여 사용된다.

이것은 부하상실시 발생하는 과도현상 기간 동안 원자로정지나 안전밸브의 개방 없이 증기우회제어계통과 급수제어계통이 핵증기공급계통을 안정한 상태로 유지하도록 해준다.

나. 원자로보호계통

예상 운전과도상태나 사고의 결과를 허용기준 이내로 제한하기 위해 안전관련 운전변수들을 계속 감시하여 미리 설정된 값에 도달하면 자동적으로 원자로를 정지시킨다. 원자로 운전을 허용할 수 있는 영역을 출력, 압력, 유량, 축방향출력 분포와 냉각재 온도 등 계측이 가능한 운전변수들에 의해 정의하고, 원자로의 운전상태가 이 영역을 벗어나면 자동적으로 정지시킨다. 보통의 경우 안전채널은 네 개의 독립된 채널을 설치하여 선정된 운전변수들을 감시한다. 원자로보호계통 논리(Logic)는 하나의 운전변수에 대해 두 개 이상의 신호가 설정치에 도달할 때에는 보호신호가 작동하도록 설계되어 있다. 만약 이러한 경우가 발생하면, 제어봉구동장치로 공급되는 전원이 차단되고 제어봉집합체들은 중력으로 노심 속으로 삽입되어 원자로를 정지시킨다. 2/4 동시논리는 보수 및 운전시험시 한 채널을 우회시킴으로써 2/3 동시논리로 전환될 수 있다. 원자로보호신호는 제어봉집합체 인출금지신호를 제외하고 수동 및 자동 제어계통들로부터 독립적이며 분리되어 있다.

실제로 사용하고 있는 원자로보호신호는 다음과 같다.

- 가변 과출력(급격한 정반응도 삽입사고시 노심보호)
- 고-대수 출력(원자로 정지상태에서 임계사고시 연료와 원자로냉각재계통 압력경계의 건전성 확보)
- 고국부출력밀도(핵연료 건전성 보호)
- 저핵비등이탈률(DNB 방지)
- 가압기 고압력(원자로냉각재계통 압력경계의 건전성 확보)
- 가압기 저압력(저 핵비등이탈률 정지신호 보조, 원자로냉각재 재고량 감소 사고 및 2차계통에 의한 과도한 냉각 사고시 원자로를 정지시키고 공학적안전계통 보조)

- 증기발생기 저수위(열제거원 상실에 의한 원자로냉각재계통 과압 방지)
- 증기발생기 고수위(습분에 의한 터빈손상 방지)
- 증기발생기 저압력(2차계통의 과도한 열제거로 인한 원자로냉각재계통 과냉방지)
- 격납건물 고압력(격납건물 내 배관파열시 격납건물 과압 방지)
- 원자로냉각재 저유량(원자로냉각재펌프 축 절단이나 소외전원상실 등으로 냉각재 유량 상실사고시 “저핵비등이탈률”에 의한 정지신호 보조 및 노심보호)
- 수동(중복 보호 기능)

다. 다중보호계통

다중보호계통은 원자로보호계통의 전반적인 신뢰성을 증대시키기 위해 간단하지만 타 계통과는 분리된 장치를 제공한다. 다중보호계통은 원자로정지와 보조급수의 기동을 위해 원자로보호계통으로부터 분리되어 있고 다중화된 논리를 이용함으로써 원자로보호 기능을 증대시킨다. 다중보호계통은 가압기 압력이 설정된 값을 초과할 때 원자로정지신호를 발생시키거나, 증기발생기 수위가 설정된 값 이하로 떨어질 때 증기발생기에 보조급수를 공급한다.

다중보호계통은 원자로보호계통과 공학적안전설비의 감지기 및 회로와는 별도의 회로로 구성되어 있다. 다중보호계통은 제어봉구동장치에 공급되는 전원을 차단하여 제어봉집합체를 노심 속으로 낙하시키기 위해 2/2 동시논리를 사용하고, 이 동시논리는 보조급수계통의 작동을 위해서도 사용된다. 다중보호계통은 모든 타 제어계통으로부터 독립되고 분리되어 있다.

라. 노 내외 핵계측 계통

핵계측 기기는 노외 및 노내 중성자속 검출기와 이와 관련된 신호처리장치로 구성되어 있다. 8개 채널로 구성된 노외핵계측기는 원자로출력을 감시한다. 2개 채널은 원자로 기동시 사용되고, 2개 채널은 원자로출력 제어용이며, 4개 채널은 원자로보호용으로 사용된다. 제어채널은 출력운전 중 원자로출력을 제어하기 위하여 사용된다. 보호채널은 원자로보호계통에서 원자로의 출력 또는 대수적 출력이 높을 때, 핵비등이탈률이 낮을 때 그리고 국부출력밀도가 높을 때 원자로를 정지시키기 위한 입력신호들을 제공하기 위하여 사용된다.

노내핵계측기는 노심내 중성자속 분포에 대한 정보를 제공하는 자기전원공급형(Self-powered) 검출기로써 노심 내에 분산 배치되어 있다.

마. 감시계통

발전소감시계통은 핵중기공급계통 및 보조설비에 대한 일반적인 감시를 수행한다. 발전소 운전조건에 대한 연속적 기록(Logging), 추이표시(Trending) 및 경보(Alarming) 등이 발전소감시계통의 주 기능을 이룬다. 발전소감시계통은 어떤 안전기능도 직접 수행하지 않는다. 발전소감시계통은 노심운전제한치감시계통(COLSS)을 그 기능의 일부로 포함하고 있다.

발전소 운전변수들을 운전원이 알 수 있도록 온도, 압력, 유량 및 액체의 수위 등이 요구된 형태로 제공된다. 보호채널들은 원자로보호계통으로부터 제공되는 정지 및 예비정지(Pre-trip) 경보 뿐 만 아니라 보호조치를 위해 사용되는 다양한 변수들을 제공한다.

발전소의 액체 및 기체 방사성물질의 유출을 감시하여 적용 가능한 방사능 제한치 내에서 유지되는 것을 확인할 수 있도록 한다.

원자력교육원

[핵심요약]

가압경수로형 원자력발전소는 저농축 우라늄(UO_2)을 핵연료로 사용하고, 1차 계통인 원자로냉각재계통은 폐회로로서 원자로냉각재펌프에 의해 강제순환 된다.

원자로냉각재로는 경수(H_2O)를 사용하며 감속재, 반사체 및 차폐체 역할을 겸하고 있다.

냉각재인 물은 원자로용기를 통과하면서 핵분열로 발생한 열에 의해 가열되어 증기발생기로 이동하고 증기발생기의 U-튜브 내부를 통과하면서 튜브 외부의 2차측 급수에 열을 전달하고 온도가 낮아진 냉각재는 원자로냉각재펌프에 의해 다시 원자로용기 입구 측으로 되돌려진다.

원자로용기와 증기발생기 사이에 설치되어 있는 1대의 가압기에는 별도의 전열기 및 분무관이 있어 1차계통의 전체 압력을 유지 및 조절하는 역할을 한다.

2차측 터빈·발전기계통 역시 폐회로이며 방사능을 띠지 않는 탈염수가 냉각수로 공급되어 1차측의 열에너지가 증기발생기의 튜브 내부를 통해 2차측의 급수로 열전달이 이루어져 1차측 보다 낮은 압력상태에서 증기로 변하게 된다.

이런 과정을 거쳐서 증기발생기에서 생성된 증기는 터빈을 회전시키고 터빈과 같은 축에 연결되어 있는 발전기에 의하여 전기에너지를 생산하게 된다.

원자력발전소의 1차계통은 원자로냉각재계통을 중심으로 원자로보조설비가 있으며, 보조설비로서 화학 및 체적 제어계통, 화학 및 체적 제어 보조계통, 기기 냉각수계통, 기기냉각해수계통, 연료저장 및 취급계통과 방사성폐기물처리계통 등으로 구성된다. 공학적안전설비로서 격납건물계통, 격납건물살수계통, 비상노심냉각계통, 보조급수계통 및 핵분열물질 제거 및 제어계통으로 구성되어 있다. 이와 함께 노내핵계측계통, 노외핵계측계통, 제어봉제어계통과 원자로보호계통 등으로 구성되어 있다.

제2장 원자로계통

제1절	원자로냉각재계통	30
제2절	원자로용기 및 내장품	52
제3절	연료집합체	73
제4절	제어봉집합체	89

제1절 원자로냉각재계통

[학습목표]

1. 원자로냉각재 계통의 목적과 기능을 이해한다.
2. 주요구성기기와 그 기능을 이해한다.
3. 다른 계통과의 상호관계를 이해한다.
4. 계통 및 주요기기의 설계기준을 이해한다.

1. 계통의 목적 및 기능

가. 계통의 목적

원자로냉각재계통의 목적은 원자로에서 열에너지를 흡수하여 2차 에너지변환계통으로 그 흡수한 열에너지를 전달해주는 것이다.

원자력발전소의 목적은 가장 깨끗한 에너지의 형태인 전기에너지를 얻는 것이다. 에너지보존의 법칙에 의해 에너지는 생성되지도 소멸되지도 않는다. 따라서 우리가 얻는 전기에너지는 다른 형태의 에너지가 변환된 것이다. 즉, 원자력발전소는 우라늄이 가지고 있는 핵에너지를 전기에너지로 바꾸는 것이다. 핵에너지는 바로 전기에너지로 변환되지 않기 때문에 몇 차례의 에너지 변환단계를 거친다. 우선 핵에너지를 열에너지로 변환하고, 그 열에너지를 운동에너지로 변환한 뒤에 그 운동에너지를 다시 전기에너지로 변환하여 우리가 원하는 최종에너지 형태인 전기에너지를 얻는다. 이 에너지 변환과정에서 원자로냉각재계통은 핵에너지가 열에너지로 변환될 수 있는 공간을 제공하고 변환된 열에너지를 수거하여 열에너지를 운동에너지로 변환하는 계통으로 전달해주는 목적을 갖는다.

나. 계통의 기능

핵에너지를 변환시켜 전기에너지를 얻는 과정에서 원자로냉각재계통이 해야 하는 역할을 앞에서 설명했다. 원자로냉각재계통이 가지는 목적을 달성하기 위하여 몇 가지 구성기기를 조합하여 계통설비를 구성하게 된다. 원자로냉각재계통이 갖는 목적

을 달성하기 위하여 구성된 이들 설비들은 여러 가지의 기능을 가지게 된다. 이들이 갖는 기능들이 계통기능이라 할 수 있는데 이들 기능은 다음과 같다.

(1) 노심에서 열을 제거하고 그 열을 증기발생기에 전달하기 위한 냉각유량을 제공한다.

핵에너지에서 변환된 열에너지를 운동에너지로 변환할 장소로 전달해 주어야 하는데 이 에너지 전달매체로 물을 사용한다. 이 물을 열에너지가 생성되는 곳에서 열에너지를 보내야 할 곳으로 흘러야 원자로냉각재계통의 목적을 달성할 수 있게 된다.

(2) 원자로냉각재압력과 냉각재 보유량을 제어한다.

에너지전달매체인 물의 밀도는 온도가 변함에 따라 변하게 된다. 이것은 결국 냉각재온도 변화가 체적변화로 나타나게 되는데 원자로냉각재계통설비는 정해진 체적을 가지므로 원자로냉각재계통에 있는 물의 체적변화를 수용할 수 있어야 한다. 이 역할을 가압기가 하게 된다.

(3) 1차계통 압력경계의 건전성을 유지한다.

열전달매체인 물을 가두어 두기 위한 원자로냉각재계통의 경계면인 배관과 기기의 용기부분이 건전해야 원자로냉각재계통의 목적을 달성할 수 있게 된다. 이 압력경계의 건전성은 고압에 의해 상실될 수 있는데 이를 위해 정해진 압력에 도달하면 과도한 압력을 방출할 수 있도록 하는 가압기에 설치된 안전밸브가 제 기능을 할 수 있어야 한다.

(4) 원자로용기헤더에서 불응축성가스와 액체배출능력을 유지한다.

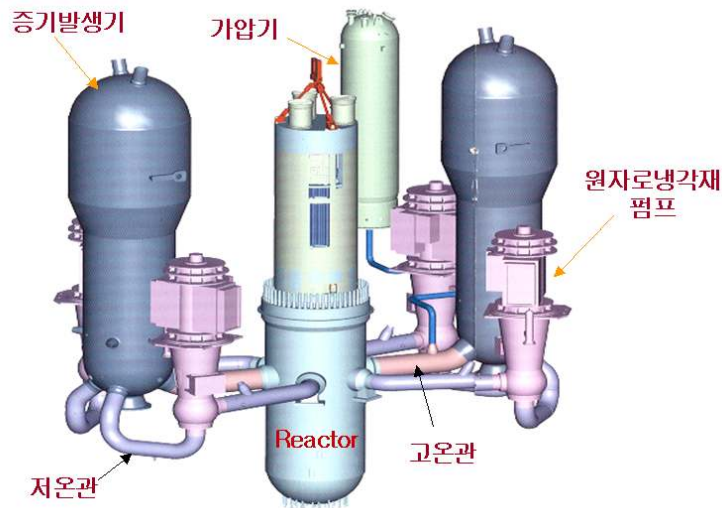
원자로용기헤더에 불응축성기체가 축적되어 있으면 사고시에 원자로와 증기발생기간에 냉각재의 자연순환이 일어나지 않게 되므로 이 불응축성가스를 제거하는 기능을 갖추고 있고 이 기능이 유지되어야 한다.

(5) 원자로냉각재계통 계측기는 노심을 보호하기 위하여 원자로보호계통과 정지계통에 입력신호를 제공한다.

원자로에서 핵에너지가 열에너지로 변환되고 이 열에너지를 받아 증기발생기를 통해 운동에너지변환계통으로 전달하여 전기에너지가 만들어지도록 하는 중에 비정상적인 상황이 발생하면 전기출력생산을 중단해야 한다. 이를 위해서 비정상상태를 감지

하여 핵에너지가 열에너지로 변환되는 것을 중단시킬 수 있도록 비정상상태를 감시할 수 있는 계측설비가 원자로냉각재계통에 설치되어 있고 그 기능을 할 수 있어야 한다.

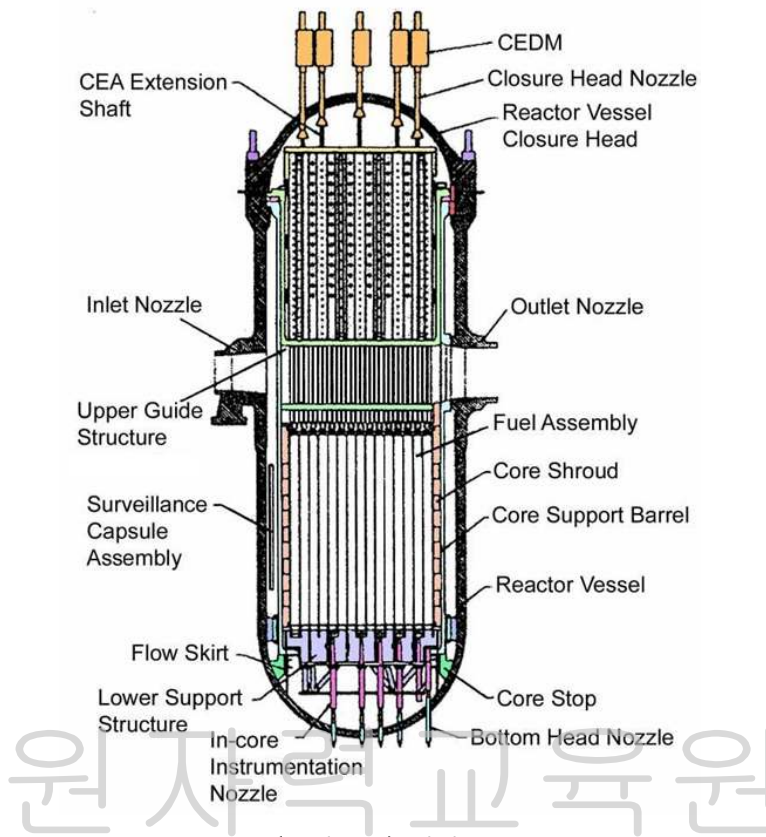
2. 주요구성기기



〔그림 2-1〕 원자로냉각재계통

우라늄이 가지고 있는 핵에너지를 열에너지로 변환시켜 그 열에너지를 수거하여 운동에너지로 변환시키는 곳으로 전달하는 원자로냉각재계통의 목적을 달성하기 위해서는 몇 가지의 주요 구성기기가 필요하다. 우선 핵에너지를 열에너지로 변환시키는 장치가 필요하고, 수거한 열에너지를 운동에너지로 변환시키는 곳으로 전달하기 위한 열교환기가 기본적으로 필요하다. 그리고 정해진 크기의 설비에서 열에너지를 많이 전달하도록 하기 위해 냉각재의 순환유량을 증가시키기 위한 펌프가 필요하다. 그리고 물이 열에너지를 수집했을 때 밀도가 감소하여 열에너지를 흡수하는 능력을 떨어뜨리는 것을 방지하기 위해 계통을 가압해주는 장치가 필요하고, 열에너지 전달매체인 물을 원하는 장소로 안내해 주는 배관이 필요하다. 그리고 계통이 가지는 에너지의 상태와 그 열에너지 전달 상태를 감시하기 위한 계측기가 필요하다. 원자로냉각재계통의 목적을 달성하기 위한 이들 구성기기에 대해 좀더 자세히 알아보도록 한다.

가. 원자로



[그림 2-2] 원자로

원자로의 역할은 핵에너지가 열에너지로 변환될 수 있는 장소를 제공하는 것이며 이 역할을 하는 중에 방사선을 방출하는 핵분열생성물질이 환경으로 나가는 것을 방지하는 2차 방벽역할도 해야 한다. 이런 역할을 하기 위하여 원자로는 2차 방벽인 용기와 핵연료를 지지하는 내장품으로 구성되어 있다.

원자로의 구성품에 대한 자세한 사항은 제2절 원자로용기 및 내장품에서 자세히 기술하고 있기 때문에 여기서는 개략적으로 설명한다.

(1) 원자로용기

원자로용기는 헤드부분과 용기 몸통부분으로 나누어져 있다. 이것은 핵연료교체

가 가능하도록 하기 위한 것이다. 원자로용기에는 여러 가지 목적의 관통부가 설치되는데 원자로에서 열에너지를 수거해가기 위해 냉각수가 들어올 수 있는 4개의 입구노즐이 설치되어 있고, 수거한 열에너지를 가지고 증기발생기 쪽으로 냉각수가 갈 수 있도록 해 놓은 2개의 출구노즐이 설치되어 있다. 상부헤드 쪽에는 제어봉, 원자로용기 수위측정기 및 불응축성가스를 방출하기위한 노즐관통부가 설치되어 있다. 하부헤더에는 노심출력을 측정하기 위한 계측기가 관통하는 노즐이 설치되어 있다.

(2) 원자로내장품

원자로내장품은 핵분열로 열에너지가 생성되도록 하기 위해 핵연료를 장전하고 지지하도록 하기 위한 구성품들로 구성되어 있다. [그림 1-2]에서 보는 바와 같이 사각모양으로 된 핵연료 다발을 감싸 지지해주기 위한 노심쉬라우드(Core Shroud), 노심쉬라우드를 지지해 주고 원자로용기와 함께 원자로로 들어오는 냉각수가 노심으로 향하도록 냉각재의 유로를 안내해 주는 노심지지통(Core Support Barrel), 하부에서 핵연료를 지지하는 하부지지구조물(Lower Support Structure), 핵분열을 중단시키거나 조절하기 위한 제어봉을 안내해주는 상부안내구조물몽치로 구성되어 있다.

(3) 원자로에서 냉각재 유로

저온관(4개의 입구 노즐) → 원자로용기와 노심지지통(Core Support Barrel) 사이 하향 유로 → 유량 분배판(Flow Shirt 또는 Flow Baffle) → 하부 공동 → 노심통 하부 지지구조물(Lower Support Structure) → 연료다발 → 상부 안내 구조물(Upper Guide Structure Assembly) → 고온관 (2개의 출구 노즐)

(4) 노심우회유량

<표 2-1> 노심 우회 유량

우회 루프(Route)	노심 우회 유량 (%)
출구 노즐 간극(Clearances)	1.46
노심 슈라우드 환형(Annulus)	0.30
안내관(Fuel Guide Tube)	0.85
정렬키(Alignment Key)	0.39
총 노심 우회 유량	3.00

원자로냉각재를 원자로로 흐르게 하는 목적은 핵연료에서 발생한 열을 흡수하기 위해서인데 냉각재가 옆에 핵연료가 없는 곳으로 흘러가는 유량은 냉각재가 원자로로 흐르는 목적을 달성하지 못하는 우회유량이다. 냉각재의 대부분은 노심에서 열을 흡수하지만 노심을 통과하지 않은 일부 유량이 <표 2-1>에 제시되어 있다.

나. 증기발생기

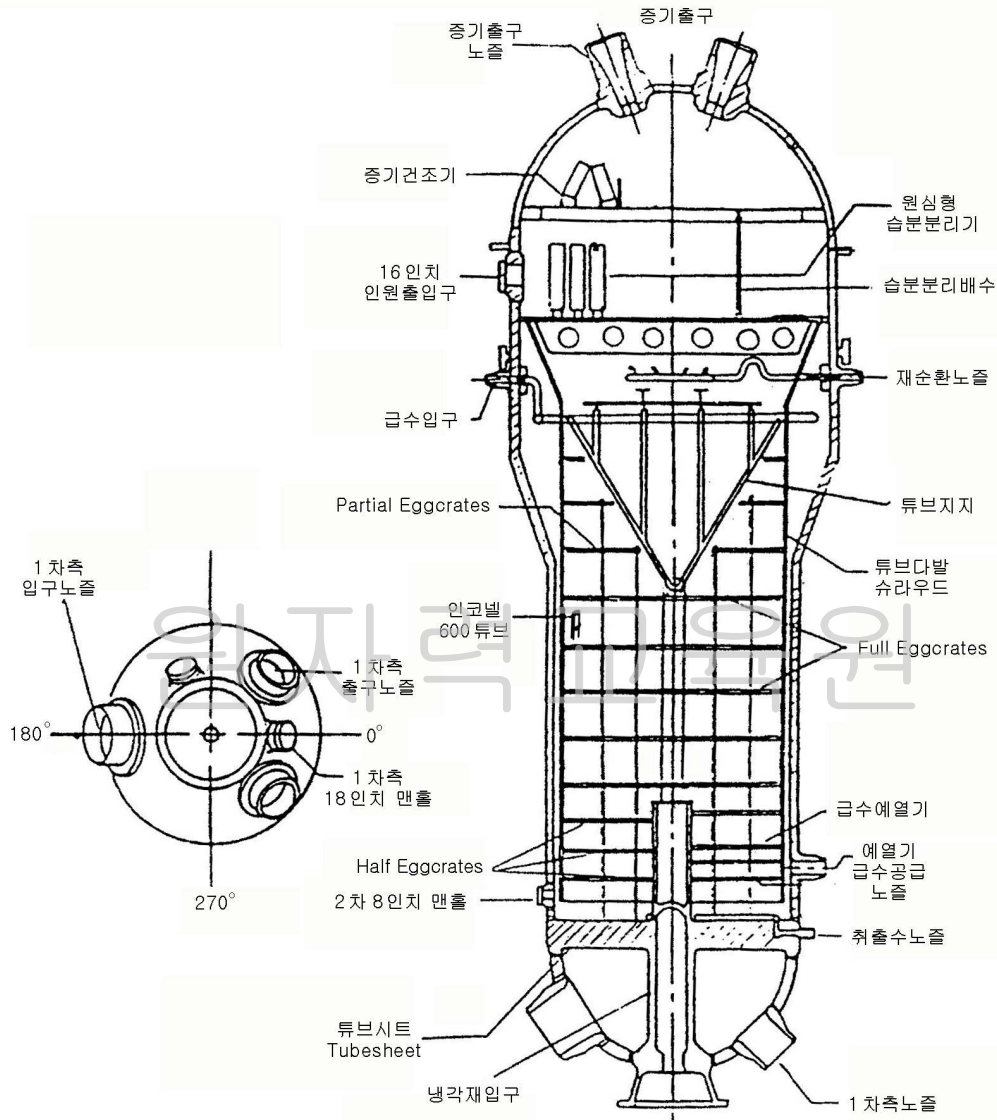
원자로냉각재계통의 목적을 달성하기 위하여 원자로에서 수거한 열에너지를 운동에너지로 변환하는 장소로 열에너지를 전달해주어야 한다. 이 역할을 하는 것이 증기발생기이다. 증기발생기는 열을 전달하는 열교환기 기능을 해야 한다. 그리고 열에너지를 운동에너지로 변환하기 위해서는 분자의 운동에너지 형태로 가지고 있는 열에너지가 분자의 이동거리가 큰 분자의 운동에너지 형태로 변환되어야 한다. 이를 위해서는 열에너지를 전달받을 때 물분자의 이동거리가 큰 증기의 형태로 변환되어야 한다. 그러므로 증기발생기는 열전달을 하면서 증기를 만드는 역할을 해야 한다.

열을 전달하면서 증기를 생성하는 능력을 최대로 하기 위하여 우리는 재순환형태의 증기발생기를 사용한다. 이 재순환형태의 증기발생기는 증기를 발생시키고 난 뒤에 그 증기를 추가적으로 가열할 수 있는 열원이 없다. 추가적으로 가열되지 않은 증기는 포화증기인데 이 포화증기에는 많은 습분을 포함하고 있다. 습분은 여러 개의 물분자가 뭉쳐져 있는 것을 말하는데 여러 개의 물분자가 뭉쳐져 있는 이 습분은 증기 분자에 비해 큰 질량을 갖기 때문에 기기를 손상시키므로 이런 습분을 제거해주어야 하고 증기발생기는 이 습분을 제거해주는 기능도 갖추어야 한다.

증기발생기는 수직 U-tube형 열교환기로서 관내측(Tube Side)에는 원자로냉각재가 흐르면서 2차 에너지변환계통으로 열에너지를 전달해 주고 동체측(Shell Side)에는 주급수가 흐르면서 원자로냉각재로부터 열을 흡수하여 증기를 생성하면서 열교환이 이루어진다. 증기발생기에서 생성된 증기는 열에너지를 운동에너지로 변환시키기 위해 터빈을 회전시키는 구동력을 제공해 주는 역할을 한다.

한국표준형원전의 증기발생기는 원자로냉각재계통에서 열을 전달받는 효율을 높이기 위하여 증기발생기에서 원자로냉각재가 나가는 곳에 예열기(Economizer)를 가지고 있다. 증기발생기의 U-튜브 재질은 인코넬 600, 튜브 개수는 8,214개가 있는데 튜

브들은 튜브 지지판에 폭발-팽창 방법으로 조립되어 있다. U-튜브는 일정한 간격으로 설치된 수평 지지판에 의해 지지되고 튜브 상부에는 진동방지대가 있어 냉각수 흐름에 의한 진동을 억제한다.



[그림 2-3] 증기발생기

증기발생기의 구조는 2편 2장 1절 증기발생기에서 상세히 설명하고 있기 때문에 여기서는 자세히 다루지 않는다.

다. 원자로냉각재배관

원자로냉각재배관은 열에너지를 수용하고 있는 냉각재를 안내하는 역할과 핵분열생성물질의 방출을 방지하기 위한 2차 방벽역할을 해야 한다.

원자로냉각재시스템의 배관은 설계열출력을 전달하고 설계압력에 견딜 수 있어야 한다. 일반적으로 냉각재 배관의 크기를 줄이기 위하여 유체속도를 증가시킬 수 있으나 빠른 유속은 배관의 침식을 유발하므로 속도를 크게 하는 데는 한계가 있다. 이런 설계 요건 및 제한사항을 고려하여 원자로 출구관의 내부직경은 106cm(42인치), 원자로 입구관 내부직경은 76.2cm(29인치)로 설계되었다.

원자로냉각재시스템 배관의 각 유로에는 가압기 밀림관, 살수관, 압력방출관, 배수관, 화학 및 체적제어계통, 안전주입계통, 정지냉각계통 등 보조계통의 배관들이 연결되어 있고 원자로냉각재와 직접 접촉하는 내부 표면은 부식을 방지하기 위하여 스테인리스강으로 되어있다.

(1) 관통관

원자로냉각재시스템 배관에는 여러 개의 보조계통 배관들이 관통하는데 이러한 관통관들은 다음과 같다.

- 가압기 밀림관 1개
- 안전주입관 입구노즐(입구 유로당 1개씩 설치)
- 정지냉각 출구노즐 2개
- 저온관에 2개의 가압기 살수노즐
- 가압기에 1개의 가압기 살수노즐
- 가압기에 2개의 안전감압계통 노즐
- 원자로용기 헤드에 1개의 배기계통 노즐
- 배기 및 배수 연결관
- 시료채취 및 계측기 연결관
- 화학 및 체적제어계통의 충전관과 유출관

라. 계측기

원자로냉각재계통과 노심의 비정상상태를 감시하고 제어하며 이상 상태 발생시 노심을 보호하기 위하여 원자로보호계통에 보호신호를 제공하기 위한 계측기가 설치되어 있다.

이를 위해 원자로냉각재계통에 설치되어 있는 계측기는 고온관 및 저온관 유로에 설치되어 있는 온도계측기와 압력계측기이다.

(1) 온도계측기

온도계측기는 고온관에 각 유로당 3개씩 설치되어 있고 저온관에 각 유로당 3개씩 설치(저온관 전체 12개 온도 계측기)되어 있다. 설치된 온도계측기의 센서에서 나오는 신호들은 여러 곳에서 나온 계측기 신호와 조합되어 각종 지시용, 제어용 신호 및 보호용 신호로 제공된다. 이들 센서에서 나온 신호들의 조합으로 생성된 신호의 종류와 용도는 다음과 같다.

- 저온관 온도 : 지시
- 고온관 온도 : 지시 및 보호
- 냉각재 평균온도 : 제어봉제어

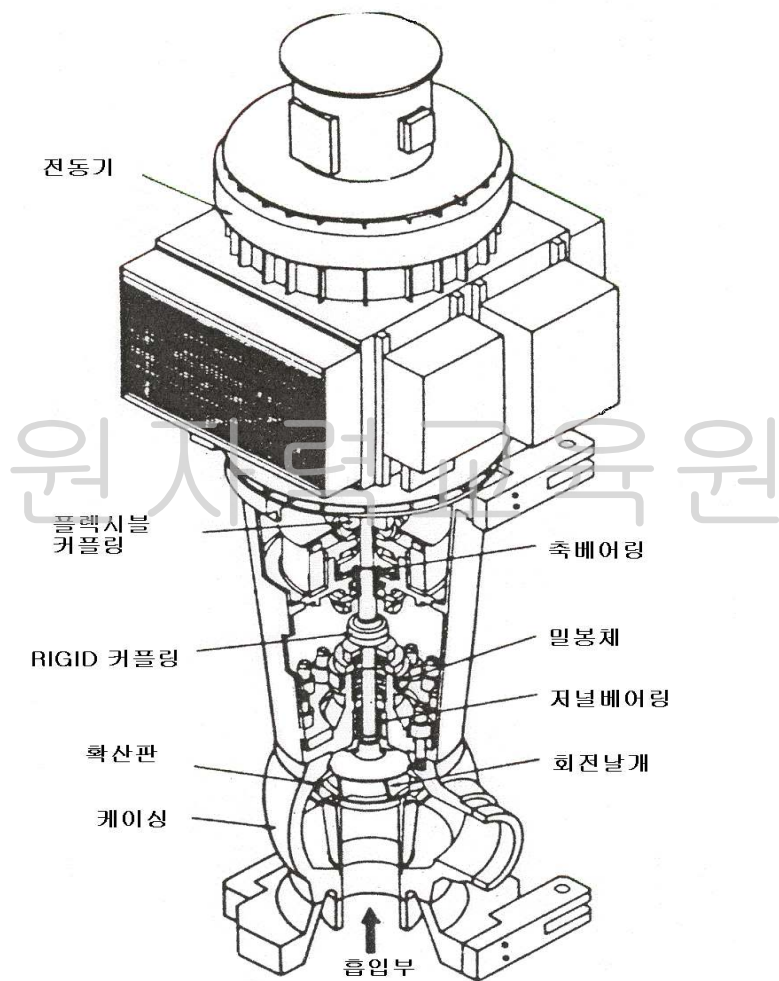
(2) 압력계측기

압력계측기는 저온관 유로에 있는 원자로냉각재펌프의 입·출구차압 계측기와 증기발생기 전후단의 압력을 측정하는 차압용 계측기가 각각 있다. 먼저 원자로냉각재 펌프 차압용 계측기는 펌프 전·후단 차압을 근거로 냉각재 유량을 환산하고 이것은 1차측 열출력계산 변수로 사용된다. 증기발생기의 차압은 원자로냉각재계통을 순환하는 유량을 알 수 있고 이 유량은 노심냉각과 관련된 보호신호로 제공된다.

- RCP 전·후단 차압
 - － 노심보호연산기(CPC) 입력신호
 - － 노심운전제한치 감시계통(COLSS) 입력신호
- 증기발생기 전·후단 차압
 - － 발전소 보호계통(PPS) 입력신호

마. 원자로냉각재펌프

원자로냉각재계통에서 원자로냉각재펌프는 원자로에서 흡수한 열을 증기발생기로 전달하는 효율을 높이기 위해 냉각수가 빨리 순환하도록 하는 구동력을 제공하는 역할을 한다. 계통에 차압을 만들어 줌으로서 물이 흘러가는 구동력을 제공하게 되는데 원자로냉각재펌프는 전기에너지를 받아 모터에서 운동에너지로 바꾸고 펌프케이싱 내에서 운동에너지를 압력에너지로 변환시켜주는 역할을 한다.

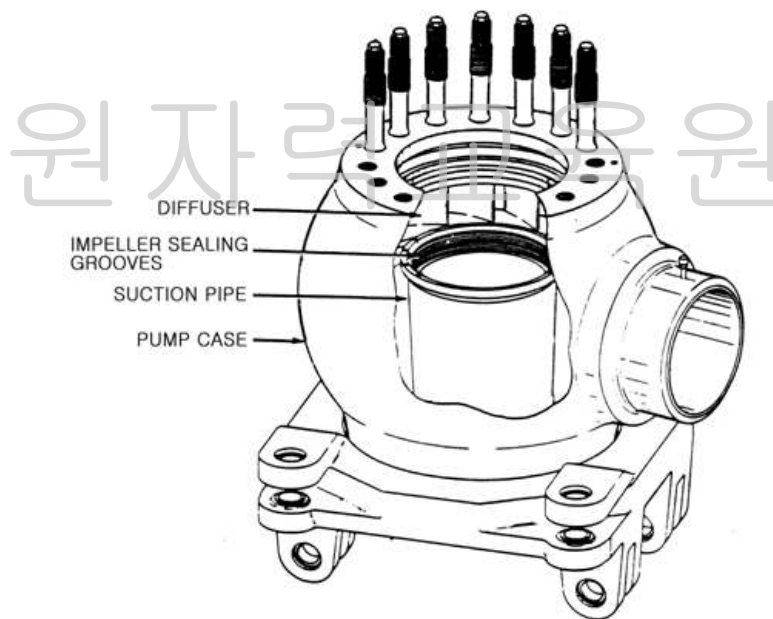


[그림 1-4] 원자로냉각재펌프

원자로냉각재펌프는 수직, 단단(Single-Stage)형이고 물은 하부에서 흡입되어 측면으로 배출되는 원심형펌프이며 상부에는 펌프를 회전시키는 전동기가 설치되어 있다. 원자로냉각재펌프는 원자로노심에서 생성된 열이 적절히 제거될 수 있도록 충분한 강제순환 유량을 제공해야 하는데 원자로냉각재 펌프의 최소 유량 제한치(설계유량)는 핵연료의 온도가 설계기준을 초과하지 않도록 하고 있다. 원자로냉각재 펌프에 설치된 관성 바퀴(Fly-Wheel)는 전동기의 전원 상실시 원자로냉각재 펌프의 감속 시간을 연장시켜 줌으로서 노심냉각에 기여하고 있다. 원자로냉각재펌프의 설계 과속은 정상 속도의 125%이다.

원자로냉각재계통수의 차압을 만들어 주는 원자로냉각재펌프의 기능을 하기 위한 주요 구성기기는 펌프케이싱, 임펠러, 확산판, 흡입배관, 밀봉하우징, 추력베어링장치 등이 있다. 또한 축을 따라 원자로냉각재가 누설되는 것을 방지하기 위한 축밀봉장치가 있다.

(1) 펌프케이싱



[그림 2-5] 펌프케이싱, 확산판, 흡입배관

펌프케이싱은 냉각수의 압력을 올려주는 동안 냉각재를 가두어 두는 역할을 한다. 펌프케이싱은 내부표면에 308/309 스테인리스강으로 피복된 탄소강(SA508)으로 된 원추형이다. 펌프케이싱은 ASME Sec.III, Class I 코드에 따라 설계 및 제작되었고, 펌프의 수력부분을 내장하고 있는 두꺼운 격벽으로 된 대칭형구조이며 모든 부하가 케이싱 벽을 통해 흡수될 수 있도록 되어 있다.

(2) 임펠러(Impeller)

임펠러는 펌프 흡입구에 들어온 냉각재의 속도수두를 높이는 역할을 하며 6개의 날개로 되어 있다. 임펠러는 냉각수가 축 방향으로 들어와서 반경방향으로 흐르도록 되어 있는 원심형 임펠러이다.

(3) 확산판(Diffuser Adapter)과 흡입배관

확산판은 임펠러가 만든 속도수두를 압력수두로 변환시켜주는 역할을 한다. 확산판은 2부분으로 분리가 가능한 11개의 날개로 되어있으며 펌프케이싱 내에 조립된다. 흡입배관은 냉각재를 임펠러의 흡입구 쪽으로 유도하는데 케이싱과 동일한 재질로 만들어지며 확산판에 의해 펌프케이싱에 지지된다.

(3) 밀봉하우징(Seal Housing)

밀봉하우징은 수운환 저널베어링과 축밀봉몽치를 감싸 보호하는 역할을 한다. 밀봉하우징은 원자로냉각재의 압력경계역할을 하며 ASME Sec.III 따라 스테인리스로 설계제작 된다.

(4) 베어링

베어링은 수운환 저널베어링과 오일운환 저널 및 추력베어링이 있으며 펌프 축 몽치를 지지하고 있다. 추력베어링 몽치는 밀봉하우징 상부 전동기 지지대 내에 위치한다. 추력베어링몽치는 양방향 작동형(Double Acting) 추력베어링과 2개의 저널베어링으로 구성되어있다. 추력베어링은 정상운전 중에는 상향추력을 지지하고 원자로냉각재계통의 저압력에서는 하향추력을 지지한다.

(4) 축 몽치

일반적으로 펌프는 모터 축과 펌프 축으로 구성되는데 원자로냉각재펌프의 경우 축 밀봉부의 점검을 용이하게 하기 위해 펌프 축 부분이 펌프 축(Pump Shaft)과

구동 축(Drive Shaft)으로 나누어져 있다. 이것은 모터와 추력베어링 뭉치를 제거하지 않고 축 밀봉 점검이 가능하도록 해준다.

(5) 축 밀봉계통

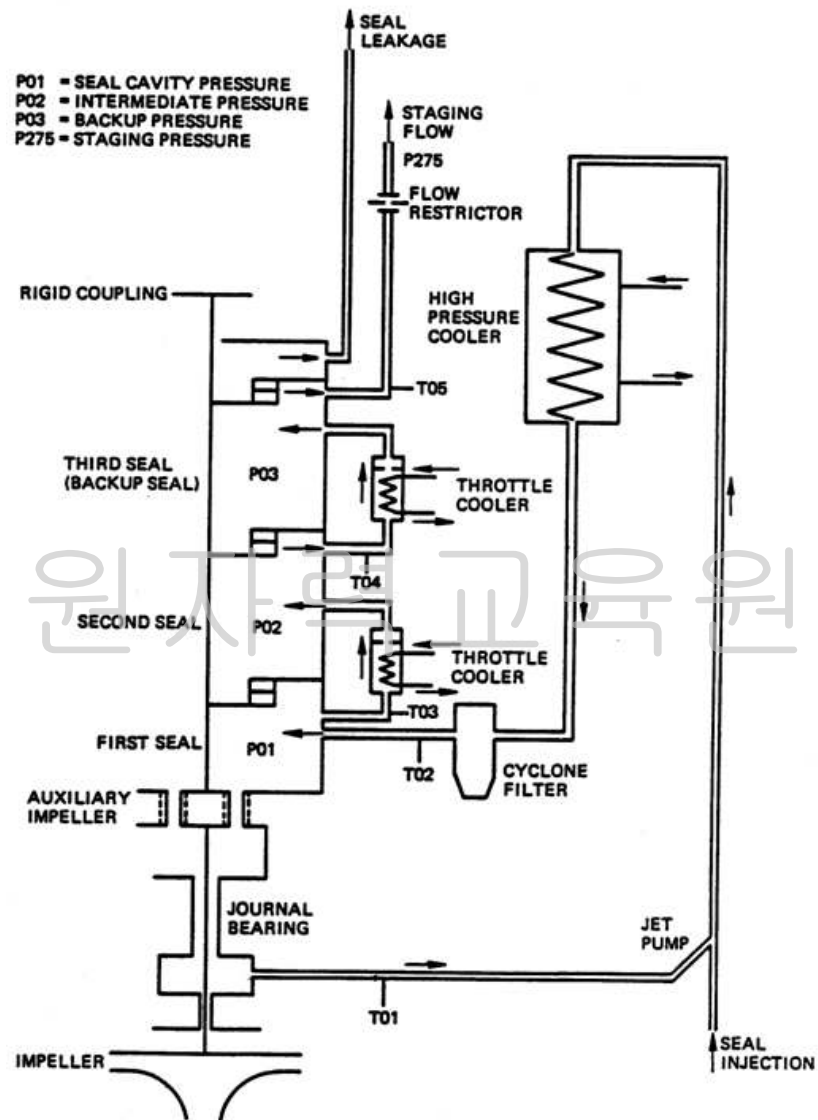
펌프 축을 따라 원자로냉각재가 누설되는 것을 방지하기 위하여 3개의 기계식 밀봉장치가 사용된다. 화학 및 체적제어계통에 의해 정화되고 화학처리 된 순수가 밀봉수로 공급된다. 기계식 축 밀봉장치는 3단으로 구성되어 있는데 1단과 2단은 수력 역학적 밀봉장치(Hydrodynamic Seals)라 하고, 3단 밀봉장치는 Vapor Seal이라 하는데 이 3개의 밀봉장치가 직렬로 설치되어 있다. 원자로냉각재계통의 압력은 축 밀봉장치에서 조절되어 제어누설 우회계통에 의해 체적제어탱크 압력으로 감소하게 된다. 밀봉 주입수의 압력(172kg/cm^2 , 2485psia)은 첫 번째 밀봉장치를 거치면서 감소하여 약 72kg/cm^2 , 1043.7psia 로 되고, 다시 두 번째 밀봉장치를 통과하면서 약 27kg/cm^2 , 398psia (84%)로 감소되고, 세 번째 밀봉장치를 통과하면서 체적제어 탱크 압력과 비슷한 압력으로 감소된다. 제어우회 누설량은 약 $0.73\text{m}^3/\text{hr}$ (3.2gpm)정도로 체적제어탱크로 유입된다.

3단 밀봉장치인 Vapor Seal을 통과한 전체 누설수는 원자로 배수탱크로 유입된다. 밀봉장치의 회전링은 카본으로 되어 있고 고정링은 텅스텐 카바이드로 되어 있다. 밀봉주입수는 수운환 저널베어링 하부에 있는 고압배관을 통해 고압냉각기로 유입되어 밀봉계통으로 유로가 형성된다.

고압냉각기로부터 나온 유출수는 1단 밀봉장치의 고압부로 유입되어 두 방향으로 유로가 형성되는데 첫 번째 유로는 보조임펠러에 의해 유량의 대부분이 수운환 저널베어링으로 흐르게 된다. 이것은 수운환 저널베어링을 냉각시키면서 밀봉계통으로 오염물질이 축적되는 것을 최소화시킨다. 두 번째 제어우회 누설유로는 1단 조절냉각기를 통해 2단 밀봉장치의 고압 측으로 유입된다. 2단 밀봉장치의 제어우회 누설유로는 2단 조절냉각기를 통해 3단 밀봉장치의 고압 측으로 유입되고, 3단 밀봉장치의 고압 측에서 유량제한기를 통해 체적제어탱크로 유입된다. 정상운전 중 제어우회누설과 밀봉누설은 밀봉주입수량과 같다.

만약 밀봉주입수가 공급되지 않으면 원자로냉각재가 펌프케이싱에서 유입되어

고압열교환기를 통해 유로가 형성됨으로서 제어우회누설과 밀봉누설 역할을 한다. 이 유량의 일부는 보조임펠러의 수운환 저널베어링과 고압냉각기를 통해 순환되고 밀봉 영역으로 회유된다. 약 48.9℃에서 1.5m³/hr(6.6gpm)의 밀봉주입수가 정상상태에서 순환된다. 이 중 0.73m³/hr(3.2gpm)이 제어누설용이고, 나머지 주입유량은 펌프케이싱을 통해 원자로냉각재계통으로 유입된다.



[그림 2-6] 밀봉주입수 유로도

바. 가압기

가압기는 원자로냉각재가 원자로에서 열을 전달 받아 증기발생기를 통해 2차 계통으로 열에너지를 전달하는 역할을 하는 과정에서 높은 온도의 냉각재가 비등하는 것을 방지하기 위해 가압을 하기 위한 것이다.

열에너지를 운동에너지로 변환하는 터빈이 최대의 효율을 내기 위해서는 원자로냉각재계통이 보다 높은 온도에서 운전되어야 한다. 온도가 높아지면 비등이 일어날 수 있는데 높은 온도에서 냉각재의 비등을 방지하기 위해 원자로냉각재계통은 주어진 운전온도에 대한 포화압력 이상으로 운전되어야 한다. 물과 증기가 포화상태로 유지되고 있는 가압기는 전체 계통에 대한 압력제어의 수단을 제공하고 있다. 가압기는 또한 계통체적 변화를 수용하고 모든 운전상태에서 원자로냉각재 온도변화에 의한 계통의 압력변화를 제한해 주고 있다.

가압기는 수직으로 설치된 원통형 압력용기이며 냉각재계통 운전압력을 적절히 제어하고, 과도운전상태에 따른 냉각재계통의 체적변화를 보상해 준다. 가압기는 원자로냉각재계통 2번 루프의 고온관에 밀림관이 연결되어 있고 밀림관으로부터 냉각재를 유입(In-Surge) 및 방출(Out-Surge)하고, 저온관 2A 및 2B로부터 오는 살수관을 가압기 상부에 설치함으로써 냉각재계통에 연결된다. 가압기 증기영역 상부에는 3개의 안전밸브가 설치되어 과잉 계통압력을 방출하며, 바닥에는 36개의 교체 가능한 직접접촉식 침수형 전열기가 수직으로 설치되어 가압기내의 냉각재 온도를 유지시킨다. 이 외에도 여러 개의 온도, 압력 및 수위 측정용 계측설비와 시료채취관 등이 설치되어 있다. 가압기의 크기에 대한 설계기준은 다



[그림 2-7] 가압기

음과 같다.

- 가압기체적은 안전주입신호 압력 이상과 원자로 고압력 정지신호 이하에서 과도 상태 발생시 냉각재계통 압력을 유지하기 위해 충분히 커야 한다.
- 가압기내 물의 체적은 원자로정지 시 냉각재계통수의 수축에 따른 가압기 물 방출을 감당하기에 충분해야 한다.
- 가압기내 물의 체적은 10% 단계 부하감소나 분당 5%(100%부터 15%까지)의 일정을 연속부하 감소가 있어도 냉각재 온도감소에 따른 수위감소에도 전열기가 노출되지 않을 만큼 충분하여야 한다.
- 증기체적은 어떠한 부하변화에서도 정상계통 체적변화에 대해 적절히 압력에 대응하기에 충분하여야 하고 또한 수위가 안전밸브 노즐에 도달하지 않고 2차 측 부하 감소시 원자로냉각재 온도증가에 따른 체적팽창으로 인한 수위증가를 수용하기에 충분하여야 한다.
- 가압기체적은 폐기물 생성을 최소화하도록 전체 냉각재계통 질량변화와 관련 충전 및 추출유량을 최소화하기에 충분하여야 한다.
- 전 체적은 설계기준사고 시에 격납용기로의 전체 질량 및 에너지 방출을 제한한다.

가압기 상부에는 내부 점검용 인원출입구(Manway)가 설치되어 있으며 하부에는 밀림관(Surge Line)이 냉각재 고온관에 연결되어 있다. 가압기살수배관은 냉각재 펌프 출구인 저온관에서 각각 가압기로 연결되어 있는데 가압기 살수 및 밀림관 노즐은 수명 기간 중 발전소의 과도현상에 견딜 수 있도록 열소매(Thermal Sleeve)가 부착되어 있다. 가압기의 재질은 내부표면이 스테인리스강으로 피복되어 있는 탄소강이다.

원자로출력 또는 터빈출력이 변화하면 원자로냉각재 온도가 변화하고 이에 따라 냉각재체적이 변한다. 만약 원자로출력 증가 또는 터빈출력이 감소되면 원자로냉각재의 온도는 상승되고 체적이 팽창되어 가압기 밀림관으로 물이 밀려들어(Insurge)가 가압기 수위가 상승하게 된다. 이와 반대로 원자로출력이 감소되거나 2차측 터빈출력이 상승하면 원자로냉각재 온도가 감소되고, 체적이 감소되어 가압기내의 물이 원자로냉각재계통으로 밀려 나가게(Outsurge) 된다. 이때 가압기 물의 방출로 수위는 감소되고

압력이 떨어진다. 이를 방지하기 위해 전열기가 작동되어 가압기내 물의 온도를 올려 압력을 상승시킨다. 만약 가압기의 수위가 지나치게 낮아지면 가압기 전열기가 물 밖으로 노출되어 손상되는 것을 방지하기 위하여 전열기의 전원이 자동으로 꺼지고 유출수 유량 차단밸브가 닫힌다. 그리고 충전유량을 많이 공급하도록 충전펌프가 추가로 자동기동이 되어 가압기 수위를 복구시킨다.

가압기는 소량의 연속살수를 하도록 되어 있는데 이는 가압기의 붕소농도 성층화(Stratification) 현상을 방지하고 밀림 및 살수배관의 온도를 유지시킴으로서 살수 제어밸브의 개방에 의한 열적 충격을 완하시킨다. 보조살수는 냉각재펌프가 정지된 상태에서 발전소 가열이나 냉각 중 가압기 분무가 가능하도록 충전펌프로부터 제공된다.

가압기의 전열기는 보조전열기와 비례전열기가 있다. 비례전열기는 정상상태에서의 열손실을 보충하고 가압기내의 증기압력을 요구치로 유지시킨다. 보조전열기는 기동/정지(ON/OFF) 제어방식으로서 정상시 정지되어 있다가 가압기 저압력 신호나 고수위 편차신호에 의해 자동모드에서 기동된다.

3. 관련 계통

원자로냉각재계통은 원자로에서 생성된 열을 흡수하여 증기발생기를 통해 전달하는 역할을 하는데 이 역할을 지속적으로 수행할 수 있도록 하고 비상시에 다른 곳에서 냉각재를 보충 받을 수 있어야 한다. 원자로냉각재계통과 연결되어 있는 관련계통에는 정상운전 중에 원자로냉각재계통을 보조해주는 화학 및 체적제어계통(CVCS), 비상시에 비상냉각수를 공급해주는 공학적안전설비계통인 비상노심냉각계통, 원자로헤드 기체배기계통, 안전감압계통, 정지냉각계통이 있다.

가. 화학 및 체적제어계통(CVCS)

화학 및 체적제어계통은 대표적인 원자로냉각재계통의 보조계통이며 이 계통은 원자로냉각재의 수질을 연속적으로 처리하여 기준치 이내로 유지하고 원자로출력을 조절하기 위한 붕소농도를 조절해주는 역할을 하기 위해 원자로냉각재계통과 연결되어 있다.

다. 원자로헤드배기계통

원자로용기헤더에 불응축성기체가 축적이 되어 있으면 사고시 냉각재가 자연 순환이 되지 않게 된다. 이런 상황을 방지하기 위하여 불응축성가스를 제거해주어야 하는데 이를 위해 원자로헤드배기계통이 원자로냉각재계통에 연결되어 있다.

라. 안전감압계통

원자로냉각재계통 압력경계에 소형 파단이 발생하면 파단 부위로 원자로냉각재가 증기로 변환되면서 빠져나가게 된다. 그러나 냉각재가 증발에 의해 상실되는 것만큼 원자로냉각재의 압력은 떨어지지 않아 고압안전주입계통이 작동을 해도 비상냉각수가 원자로냉각재계통으로 밀고 들어가지 못한다. 이런 경우 인위적으로 안전감압계통을 통해 계통압력을 방출하여 비상노심냉각수가 공급될 수 있도록 하기 위한 안전감압계통이 원자로냉각재계통과 연결되어 있다.

마. 정지냉각계통

핵연료를 교체하기 위해서는 원자로냉각재의 온도를 낮추어야 한다. 원자로냉각재의 온도가 높을 때는 냉각재의 온도를 낮추기 위해 증기발생기에 급수를 공급하고 증기를 방출함으로써 원자로냉각재의 온도를 낮춘다. 그러나 냉각재 온도가 176.7℃ (350°F)까지 감소하면 증기발생기로 급수를 공급해도 증발현상이 잘 일어나지 않아 냉각이 쉽게 이루어지지 않는다. 이때는 원자로냉각재를 추출하여 기기냉각 계통수와 열교환을 통해 냉각을 해야 하는데 이를 위해 정지냉각계통이 원자로냉각재계통과 연결되어 있다.

4. 주요설계사항

가. 설계기준

원자로냉각재계통 미국원자력규제위원회의 일반설계기준과 ASME Code Section III에 따라 설계하므로 설계기준은 일반설계기준과 ASME Code Section III이다.

가압경수로인 한국표준형원자로의 일반적인 설계사항은 다음과 같다.

(1) 일정압력제어

원자로냉각재계통의 압력은 무부하 운전(0%)에서 정격출력(100%)까지 일정압력(158.2kg/cm²)으로 유지한다. 일정압력은 가압기에 설치된 침수형전열기와 가압기 살수로 유지한다.

(2) 과압방지

계통압력이 설계압력의 110% 이상 상승할 때 계통 과압을 방지하기 위하여 스프링으로 작동하는 가압기 안전밸브가 작동하여 증기를 화학 및 체적제어 계통의 일부인 원자로냉각재 배수탱크(RDT)내 수중으로 방출하도록 되어 있다.

원자로냉각재 온도/압력이 350°F(176.7℃) /410psia (28.8kg/cm²a) 이하인 저온상태에서 과압에 대한 보호를 위하여 2개의 원자로정지냉각계통(SCS) 흡입 측에 설치되어 있는 압력방출밸브가 원자로냉각재 계통의 저온과압(LTOP)을 방지한다.

(3) 화학 및 수질조건을 만족시키기 위해 연속적인 정화처리 가능

화학 및 체적제어계통이 원자로냉각재계통의 화학 및 수질조건을 만족시키기 위하여 연속정화처리를 한다.

(4) 부식을 최소화하기 위해 오스테나이트계 S/S사용

(5) 누설감시 설비설치

원자로냉각재의 누설을 감시할 수 있는 설비가 있으며 확인 및 미확인 누설량에 따라 발전소 정지여부를 결정한다.

나. 계통설계변수

<표 2-2> 주요설계변수

변 수	단 위	설계치
설계 열출력 (RCP 첨가열 및 계통손실 포함)	MWt	2,825
설계압력	psia / kg/cm ²	2,500 / 175.8
설계온도(가압기 제외)	°F / °C	650 / 343.3
가압기 설계온도	°F / °C	700 / 371
총 유량율(4대 RCP 운전시)	lb/hr / m ³ /hr	121.5×10 ⁶ / 55.1×10 ³
저온관 온도	°F / °C	564.5 / 295.8
고온관 온도	°F, °C	621.2 / 327.3
평균 온도	°F, °C	592.9 / 311.6
정상 운전 압력	psia / kg/cm ²	2250 / 158.2
냉각재 체적(가압기 제외)	ft ³ / m ³	10,008 / 283.4
가압기 물 체적(전출력)	ft ³ / m ³	905 / 25.6
가압기 증기 체적(전출력)	ft ³ / m ³	910 / 25.7

[핵심요약]

1. 원자로냉각재계통의 기능

- 노심에서 열을 제거하고 그 열을 증기발생기에 전달하기 위한 냉각유량을 제공
- 원자로냉각재압력과 냉각재 보유량 제어
- 1차 계통 압력경계의 건전성 유지
- 원자로용기헤더에서 불응축성가스와 액체배출능력 유지
- 원자로냉각재계통 계측기는 노심을 보호하기 위하여 원자로보호계통과 정지 계통에 입력신호 제공

2. 원자로용기 내에서 내각재의 주유로

저온관(4개의 입구 노즐) → 원자로용기와 노심지지통(Core Support Barrel) 사이 하향 유로 → 유량 분배판(Flow Shirt 또는 Flow Baffle) → 하부 공동 → 노심통 하부 지지 구조물(Lower Support Structure) → 연료다발 → 상부 안내 구조물(Upper Guide Structure Assembly) → 고온관 (2개의 출구 노즐)

3. 원자로냉각재에서 노심의 우회유량

- 출구노즐간극, 노심슈라우드 환형, 안내관, 정렬키

4. RCP의 구성기기와 그 기능

- 케이싱, 임펠러, 확산판, 흡입배관, 축몽치, 스러스트베어링 몽치

5. 가압기의 크기에 대한 설계기준

- 과도 상태시에 원자로냉각재 체적변화를 수용할 수 있어야 함
- 폐기물생성최소화

6. 원자로냉각재계통과 연결된 계통

- 화학 및 체적제어계통, 안전주입계통, 정지냉각계통, 원자로헤드배기계통, 안전감압계통

7. 원자로냉각재계통의 주요 설계사항

- 일반설계기준과 ASME Section III에 따라 설계, 일정압력제어, 과압방지, 화학 및 수질 조건을 만족시키기 위해 연속적인 정화처리, 누설감시설비 설치

제2절 원자로용기 및 내장품

[학습목표]

1. 원자로의 기능을 이해한다.
2. 원자로용기의 구조를 이해한다.
3. 원자로내장품의 구조를 이해한다.
4. 각 구성품의 기능을 이해한다.

1. 원자로의 기능

원자로용기 및 내장품은 내부에 연료를 장전하여 출력생산을 하고, 다중방호벽 중 제2방벽 역할을 한다. 원자로는 반구형 하부헤드와 플랜지 및 오링 홈이 있는 분리 가능한 상부헤드와 원통형 용기 및 연료집합체, 노심지지구조물, 제어봉집합체 및 기타 관련 설비로 구성되어 있다. 원자로 내부구조물은 원자로 내장설비들을 지지하며, 원자로용기를 통과하는 냉각재의 안내 역할을 한다. 폐쇄된 용기내의 동적, 정적부하를 흡수하여 원자로용기 플랜지에 전달한다. 원자로 내부구조물은 노심지지동체, 하부지지구조물/노내계측기 집합체, 노심보호벽 그리고 상부안내구조물로 구성된다.

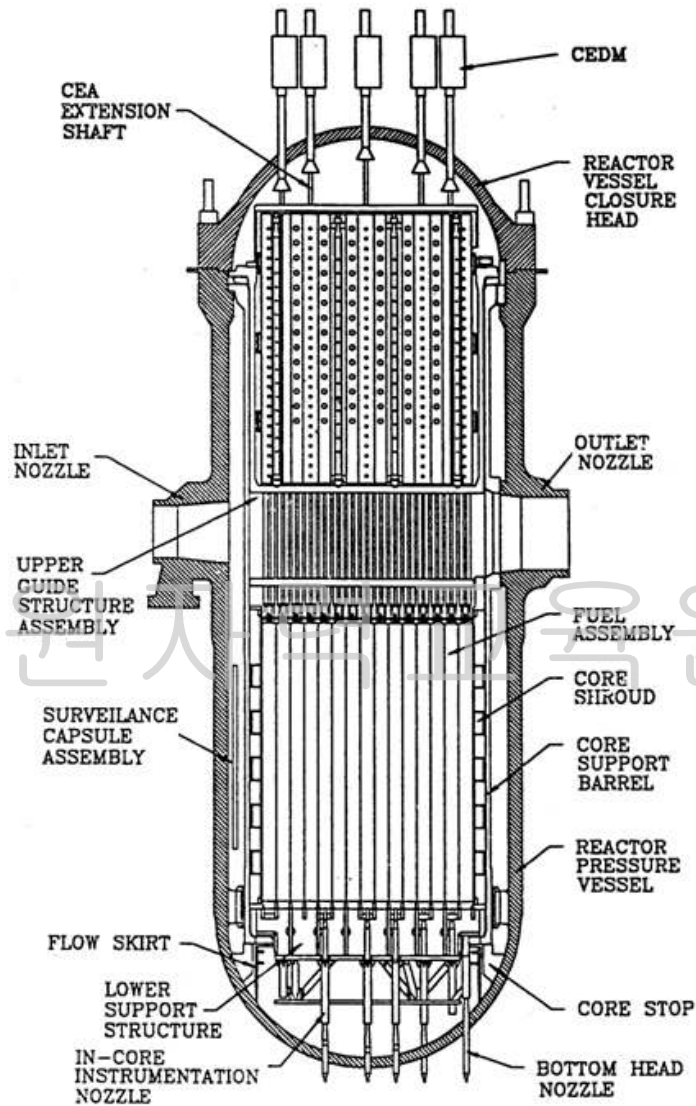
노심지지동체는 원통형 구조물로서 상단부의 환형 플랜지가 원자로용기의 턱(Ledge)에 얹혀 지지된다. 노심지지동체 하부에는 스너버(Snubber)가 설치되어 있어 측면운동과 비틀림 운동을 제한한다. 하부지지구조물은 노심의 중량을 보(Beam) 구조물을 통해 노심지지동체에 전달한다. 노심 보호벽은 노심을 둘러싸고 있으며, 노심의 우회유량을 최소화시킨다. 상부안내구조물은 냉각재의 유동으로부터 제어봉집합체를 보호하고, 압력 과도상태 동안 핵연료집합체가 떠오르는 것을 막아준다.

2. 원자로용기

가. 기능

원자로용기는 연료집합체, 제어봉집합체(CEA) 및 노심지지체에 필요한 내부구조물

들을 내장하며, 중성자와 감마선에 견디고 높은 강도를 유지할 수 있는 탄소강 재질로 제작되었으며 내면은 부식방지를 위해 오스테나이트 스테인리스강으로 피복되어 있다. 원자로용기는 반구형헤드인 상부헤드(Upper Head) 및 하부헤드(Lower Head)와 용기 몸통(Rx Vessel Body)으로 구성되어 있다.



[그림 2-9] 원자로용기

나. 상부헤드(Upper Head)

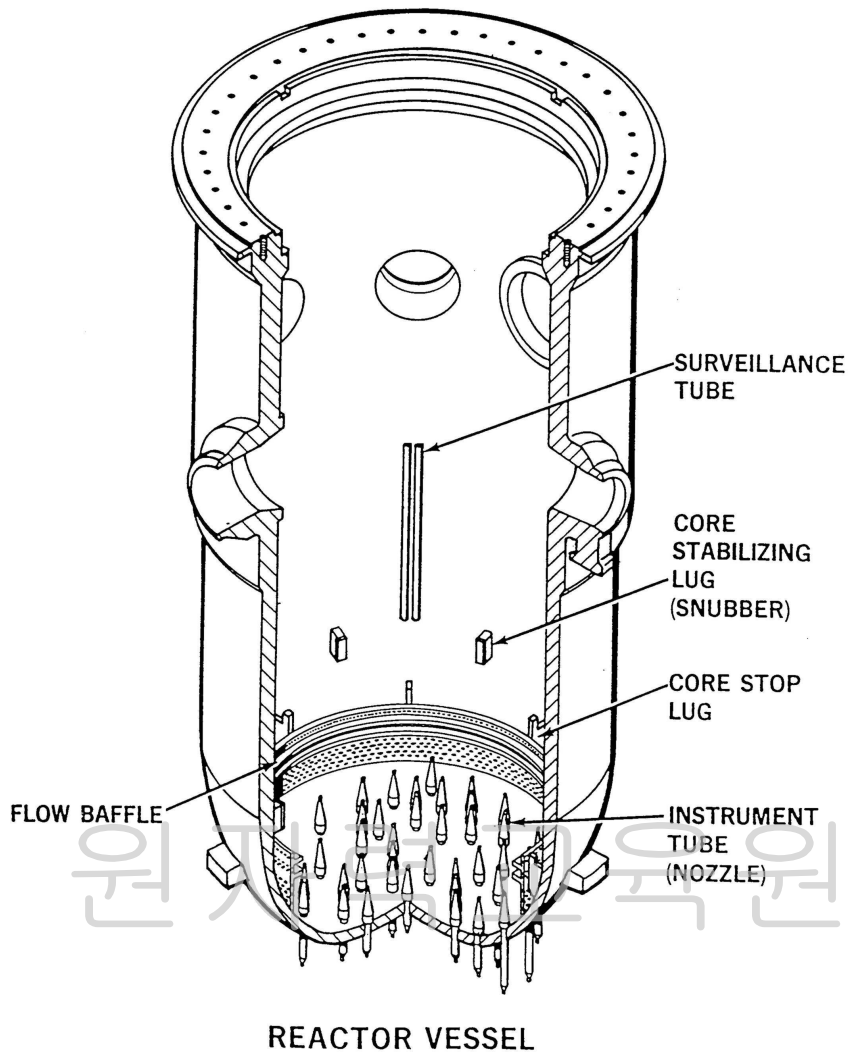
원자로용기 상부헤드에는 총 84개의 관통구가 있는데, 이들은 73개의 제어봉 구동장치(CEDM) 하우징, 사고시 기포제거로 자연순환에 의한 노심냉각능력을 제공하기 위한 1개의 원자로용기헤드배기구, 2개의 가열접점 열전대(HJTC)용 관통부 및 8개의 예비용으로 구성된다. 제어봉구동장치하우징과 배기관은 상부헤드 내면에 용접되고, 상부헤드는 54개의 스티드 볼트에 의해 원자로용기플랜지에 고정된다.

원자로용기 뚜껑은 제어봉구동장치(CEDM) 및 가열접점열전대(HJTC)노즐과 원자로용기의 증기 및 비응축성 기체 제거용(RGVS) 노즐을 포함하며, 운전 중에서는 54개의 스티드 볼트로 체결되는 플랜지로 용기에 부착되고, 원자로 내장품 취급시에는 용기뚜껑 제거가 가능하도록 되어 있다.

다. 하부헤드(Lower Head)

하부헤드는 원자로용기 몸통(Shell)에 용접되었으며 노내 핵계측기용 관통관 노즐이 45개 설치되어 있다. 노심지지통이 하향 낙하될 때 그 변위를 제한하기 위해 6개의 노심 멈춤쇠(Core Stop)가 원자로용기 하부헤드 내측에 설치되어 있다.

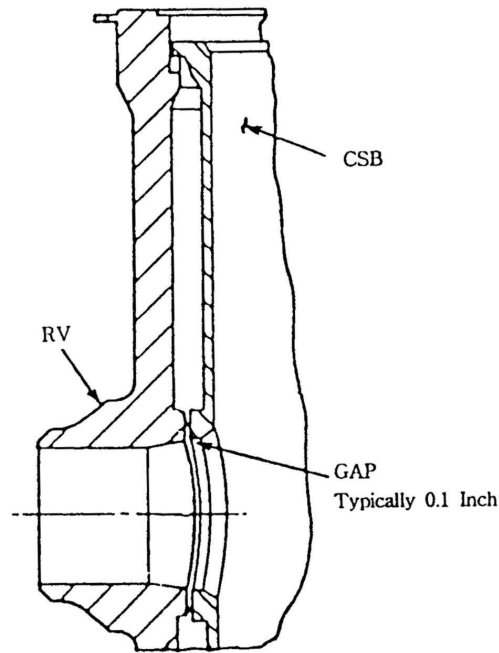
하부헤드에는 유량분배를 위해 유량분배환(Flow Skirt)이 용접 부착되어 있으며 노내 핵계측설비 인입용 노즐들이 내부에 용접되어 있다. 인코넬 재질로 된 유량분배환은 원통형이며 유량형성을 위한 구멍들이 가공되어 있고 두 개의 보강 링으로 보강 처리 되어있다. 유량배분환은 노심내로 유입되는 유량을 균일하게 분배하여 하부 공동(Lower Plenum)에서의 큰 와류형성을 방지해 준다. 이것은 압력용기 하부헤드에 균일한 간격으로 용접 부착된 9개의 가공부위에 의해 지지된다.



[그림 2-10] 하부헤드와 원자로용기 몸통

라. 원자로용기 몸통(Rx Vessel Body)

원자로용기플랜지는 안쪽표면에 턱(Ledge)이 가공된 단조 링으로서 노심지지통을 지지하고 노심지지통은 노심과 내장설비를 지지하도록 설계되었다. 또한 원자로용기플랜지에는 원자로용기 뚜껑을 체결하는 54개의 스테드 볼트를 체결하도록 구멍이 뚫어져서 나사산이 가공되어 있다.



Reactor Vessel/Internals Interface
(CSB & Vessel Outlet Nozzles)

〔그림 2-11〕 원자로용기 및 노심지지통과 출구노즐 접촉부

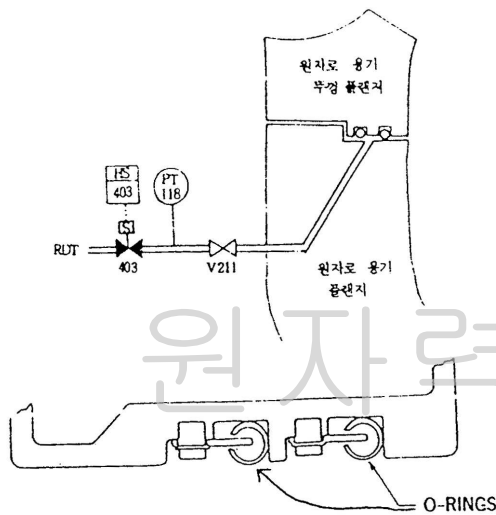
원자로용기 몸통에는 두껍고 구배가 형성되어 있는 6개의 입·출구 노즐이 있다. 이중 4개의 입구관 내경은 30"(76.2cm)이고, 2개의 출구관 내경은 42"(106.7cm)이다.

각 출구노즐 주변의 원자로용기 내부로 돌출된 환형 턱(Boss)은 노심지지통면과 맞닿아서 고온과 저온지역을 분리시켜주며 약간의 틈을 둠으로서 열팽창이 허용되고 노심 우회유량이 적절하게 조절된다.

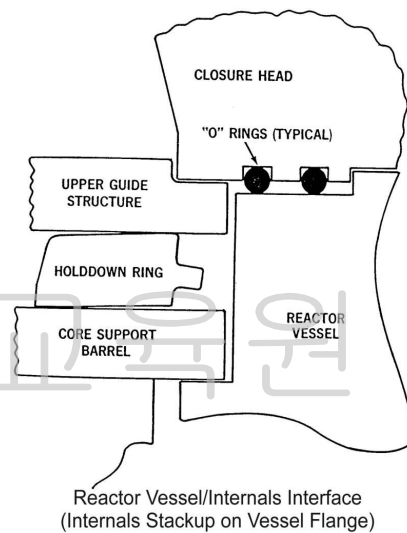
원자로용기 몸통의 하부 내부에 있는 6개의 스너버(Snubber)들은 노심지지통(CSB)의 반경반향 변위를 제한하며, 원자로용기 내면의 노심 부분에는 감시시편 캡슐 홀더가 위치하며, 냉각재 입·출구 배관을 비롯한 이상의 모든 구성품들은 용접으로 부착되었다.

원자로용기와 헤드플랜지 사이에는 2개의 은도금(Coating)된 인코넬 재료의 "O"

링이 설치되어 누설을 방지하며, 이는 속이 빈 “O”링 노심측 내면의 클립(Clip) 구멍을 통한 냉각재계통 압력이 증가함에 따라 더욱 밀착되는 원리(Self-energized)에 의해 밀봉이 이루어진다. 두 “O”링 중 어느 하나라도 100% 누설을 방지할 수 있으나, 보통 내측 링이 밀봉을 수행하고, 외측 링은 보조역할을 하며 두 “O”링 사이의 공간에는 누설 탐지용관이 설치되어 있다. 이들은 헤드플랜지의 2개 동심 홈에 특수클립을 사용하여 고정하되, 은도금을 하여 불균일한 표면에 따라 변형되도록 함으로서 확실한 밀봉이 이루어지도록 한다. 원자로용기의 입구노즐 아래에는 4개의 수직기둥들이 설치되어 원자로용기를 지지하고 있으며, 이들은 수평 열팽창에 대한 유연성을 가지고 있어 원자로의 가열과 냉각시 응력을 받지 않도록 한다.

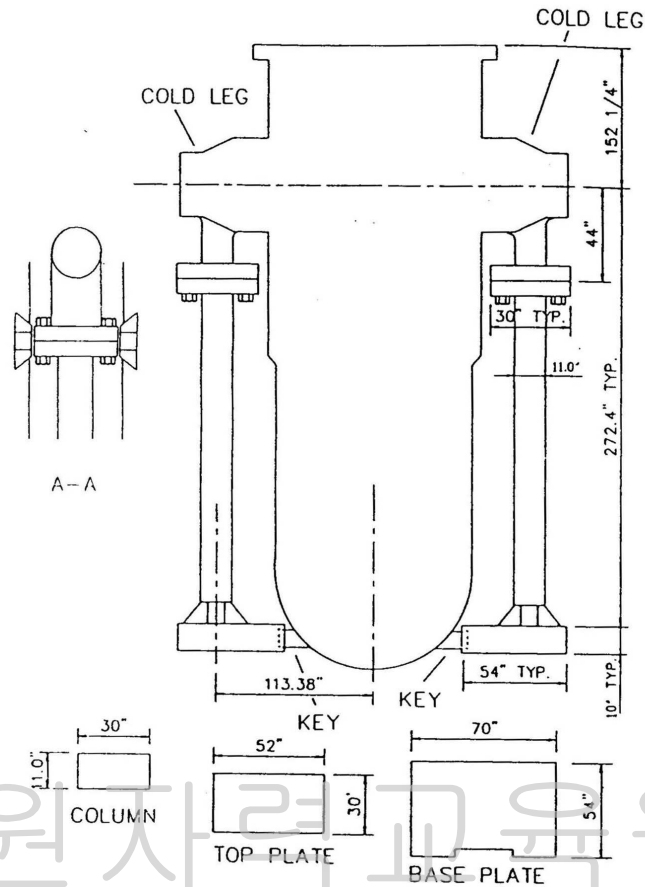


[그림 2-12] 원자로용기 플랜지의 밀봉용 O-Ring



[그림 2-13] 밀봉용 O-Ring 단면도

[그림 2-14]에서 보는 바와 같이 원자로용기 하부헤드에는 4개의 수평키가 용접되어 있으며 수직기둥의 밑판(Base Plate)은 용기의 아래 부분을 고정시키도록 키웨이 역할을 한다.



Notes : 1. Dimensions are for reference only.
2. This figure is for pictorial purpose only.

Reactor Vessel Support

[그림 2-14] 원자로용기 지지대

마. 원자로노심

원자로노심은 177개의 연료집합체와 73개의 제어봉집합체가 150"(3.8m) 길이에 걸쳐서 123"(3.12m)의 등가직경으로 둥글게 배치되어 있다. 연료집합체는 16×16 배치로서 236개의 연료봉과 스페이서 그리드(Spacer Grid)에 용접된 5개의 안내관으로 이루어지고, 상·하부는 엔드피팅(End Fitting)으로 막혀 있다. 각 안내관은 연료봉 4개

의 공간과 동일한 크기를 차지하며 전체 길이에 걸쳐 제어봉집합체의 안내통로 역할을 한다. 노내핵계측 설비는 45개의 핵연료집합체의 중앙 안내관에 설치되며 이는 원자로용기 하부를 통과하여 핵연료집합체의 하부로 연결된다.

원자로 내장설비들은 핵연료집합체, 제어봉집합체 및 노내 중성자속 감시설비들을 지지하고 원자로용기를 통과하는 냉각재를 안내함과 동시에 용기 내의 정적 및 동적 부하를 흡수하여 원자로용기의 플랜지로 전달한다.

원자로용기와 관련된 열 및 수력학적 사양은 다음과 같다.

<표 2-3> 열수력학적 설계 변수

원자로 노심 열출력, MWt	2,815
설계압, psia (kg/cm ² a)	2,500(175.8)
운전압, psia (kg/cm ² a)	2,250(158.2)
냉각재 출구온도, °F(°C)	621.2(327.3)
냉각재 입구온도, °F(°C)	564.5(296)
냉각재 출구상태	과냉각
총 냉각재 유량, gpm (m ³ /h)	330,000(90,010)
입구 BTU/lb(kcal/kg)	565(313.9)
출구 BTU/lb(kcal/kg)	645(358.3)
입구 lb/ft ³ (g/cm ³)	45.9(0.735)
출구 lb/ft ³ (g/cm ³)	41.2(0.660)

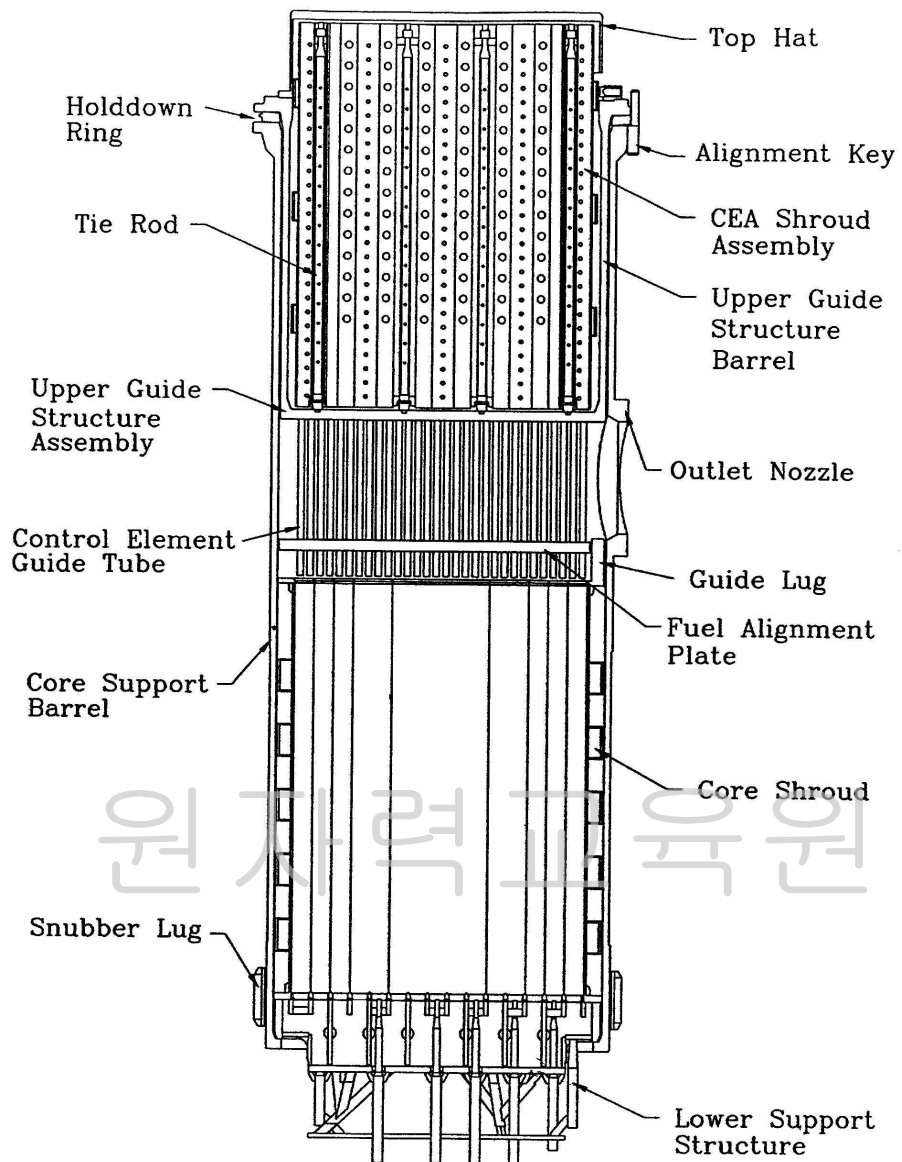
3. 원자로 내부구조물

원자로 내부구조물은 크게 두 가지로 구분되는데 이는 노심지지통뿔치(Core Support Barrel Assembly)와 상부안내구조물뿔치(Upper Guide Structure Assembly)이다. 유량배분환(Flow Skirt)은 냉각재유로를 형성하는 일부분으로 역할을 하지만 내장품과는 격리되어 압력용기(Pressure Vessel) 하부헤드에 부착되어 있다.

가. 노심지지통 몽치(Core Support Barrel Assembly)

오스테나이트 스테인리스강 재질이며 노심지지통(Core Support Barrel) 하부지지 구조물(Lower Support Structure), 노심슈라우드(Core Shroud), 계기용 노즐몽치(Instrument Nozzle Assembly)로 구성되어 있다. 노심지지통몽치는 노심지지통의 상부플랜지(Upper Flange)에 의해 지지되는데, 이 상부플랜지는 원자로용기 턱(Ledge)에 걸쳐져 있다.

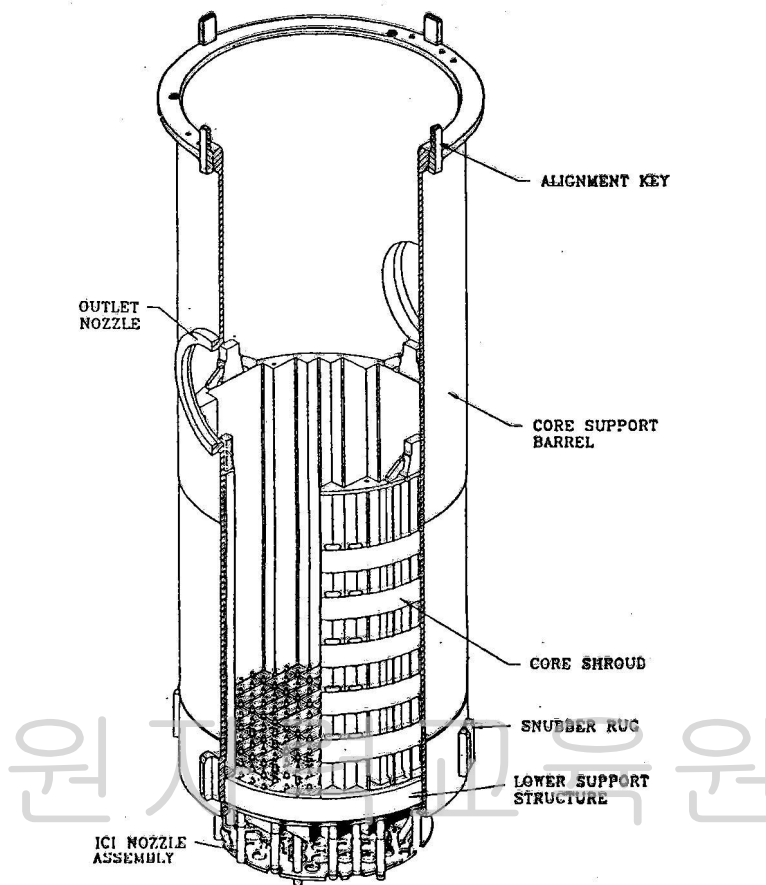
상부플랜지에는 4개의 동일한 키 홈이 가공되고 원자로용기 턱 및 외부링 플랜지에는 4개의 정렬키(Alignment Key)가 설치되어 서로 끼워져 정렬이 이루어진다. 노심 지지통의 하부플랜지는 하부지지구조물(Lower Support Structure)을 지지, 보호, 정위치 시키고 용접부의 만곡형(Flexural) 접착방법으로 하부지지구조물에 부착된다. 하부지지구조물은 부하를 노심지지통 하부플랜지에 전달하는 지지 빔(Support Beam)에 의해 노심을 지지할 수 있도록 해주며, 지지 빔에 설치된 위치핀(Locating Pin)은 핵연료집합체의 하부를 정위치 시켜준다. 노심슈라우드(Core Shroud)는 냉각재 유로 형성 및 냉각재의 노심 우회유량을 제한하고 하부지지구조물에 의해 지지 및 정렬된다. 노심지지통의 하단 외측에는 등 간격으로 6개의 스너버(Snubber)가 설치되어 있어 압력용기(Pressure Vessel)의 상대 리그(Lug)와 요철조합을 형성하여 원주방향 또는 뒤틀림에 의한 운동을 제한한다.



CORE SUPPORT/INTERNAL STRUCTURE ASSEMBLY

[그림 2-15] 원자로용기 내부 구조물

(1) 노심지지통(Core Support Barrel)

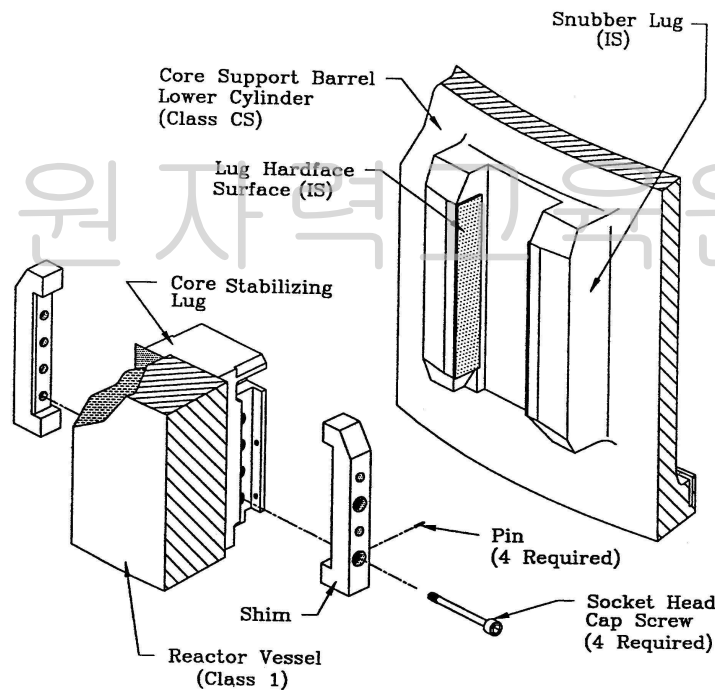


Core Support Barrel Assembly

[그림 2-16] 노심지지통(CSB) 집합체

노심지지통은 원통형으로서 상부에는 외부형 플랜지, 하부에는 내부링 플랜지로 되어 있다. 또한 원자로용기 턱에 얹혀져 지지되고 핵연료집합체가 놓여지는 하부지지 구조물을 지지한다. 노심지지통의 플랜지에는 4개의 정렬키가 90°간격으로 압착설치 (Pressfitted)되어 있어 원자로용기, 상부안내구조물몽치, 플랜지 등이 이 정렬키에 대응

하여 삽입됨으로서 상호 정렬된다. 노심통의 상부에는 두 개의 출구노즐이 있는데 압력 용기 노즐부와 잘 접촉되어 있어 입구노즐에서 출구노즐로의 냉각재 누설유량을 최소화시킨다. 노심지지통의 자체하중은 그 상부에서 지지됨으로써 냉각재의 흐름에 의한 구조물 내부에서의 진동이 증가할 수 있다. 따라서 진폭제한 장치로 스너버(Snubbers)가 노심지지통 하단의 외부에 설치되어 있다. 스너버는 노심통 주위에 균등한 간격으로 6개가 있으며, 원자로용기 측의 상대 러그(Lugs)들과 요철 조합형태로 되어있어 원주 방향 또는 뒤틀림에 의한 잉여운동 및 진동크기를 최소화 한다. 조립과정에서 내부구조물이 압력용기 내 하단에 장착되면서 원자로용기 측의 러그들은 노심지지통의 러그들과 축 방향으로 맞춰진다. 노심지지통의 반경방향 및 축 방향 팽창은 약간 허용되지만 측면(원주방향)운동은 제한되는 것이다. 원자로용기 측 러그(쉽 : Shims)들은 볼트로 조여져 부착되며, 노심지지통 측의 러그들은 마모를 줄이기 위해 스텔라이트(Stellite)로 된 경화표면(Hardface)으로 되어 있다.

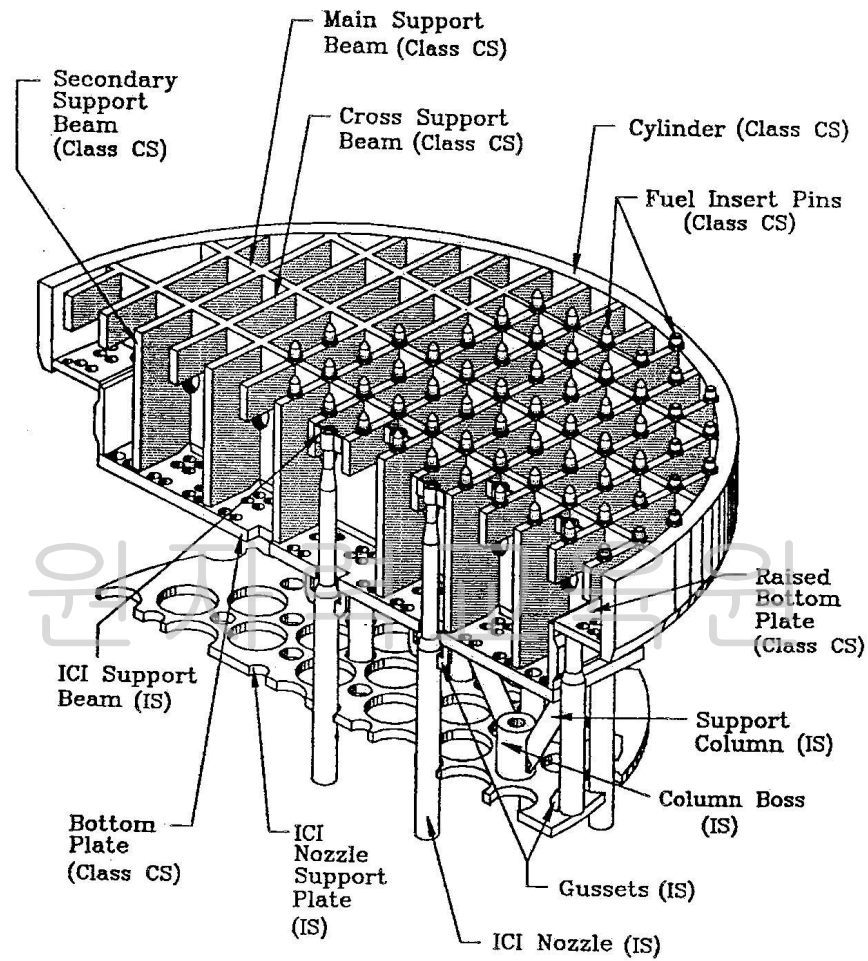


CORE SUPPORT BARREL SNUBBER

[그림 2-17] 원자로용기와 노심지지통 스너버 집합체

(2) 하부지지구조물(Lower Support Structure)

하부지지구조물은 연료 다발, 노심 슈라우드 및 노내핵계측 노즐의 위치를 지정해주고 이를 지지한다. 이 구조물은 지지원통(Cylinder), 지지빔(Support Beam), 바닥판(Bottom Plates)으로 구성되어 있다.



LOWER SUPPORT STRUCTURE/IN-CORE
INSTRUMENTATION NOZZLE ASSEMBLY

[그림 2-18] 하부지지구조물 및 노내핵계측기 지지물

지지원통은 계란판형(Egg-crate Fashion)으로 배열된 격자 빔(Grid Beams) 조합체를 감싸고 있고 이들 빔들의 끝부분은 원통에 용접되어 있으며, 빔에는 핵연료 다발의 위치를 정해주는 핀(Fuel Locating Pins)이 붙어 있다. 이 빔들의 밑 부분은 바닥판(Bottom Plate)에 용접되어 있으며 바닥판에는 적절한 유량분배가 이루어지도록 구멍들이 가공되어 있다. 또한 지지원통은 유체흐름을 안내하고 지지원통 바닥근처에 위치한 구멍들을 통해 형성되는 노심슈라우드(Core Shroud)의 우회유량(0.22%)을 제한한다.

(3) 노내핵계측기 노즐몽치(ICI Nozzle Ass'y)

노내핵계측기(ICI) 노즐몽치는 노내핵계측 노즐, 노내핵계측 노즐지지판(ICI Nozzle Support Plate) 및 지지기둥(Support Column) 등으로 구성되어 있으며, 이들은 바닥판(Bottom Plate)에 의해 지지된다.

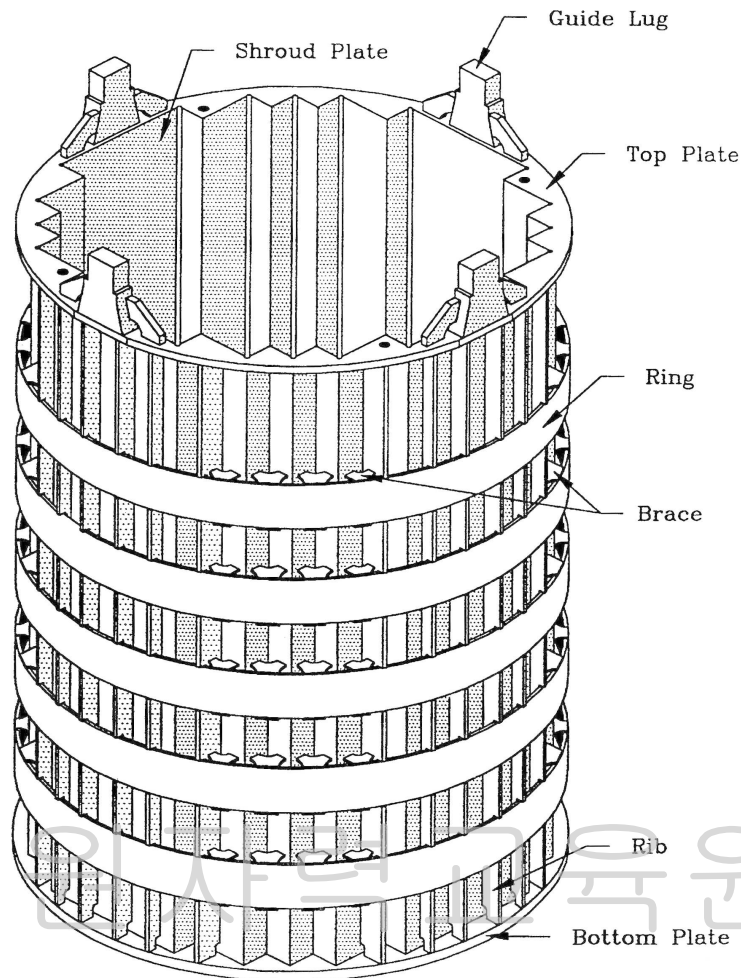
노내핵계측 노즐 지지판은 노즐의 측면지지 역할을 하며 구멍을 통해 적절한 유량분배가 이루어지도록 유도한다.

(4) 노심슈라우드(Core Shroud)

노심슈라우드는 노심의 측면을 둘러싸서 냉각재우회유량을 제한하며, 노심통과 냉각재의 유로방향을 정해주는 용접된 수직관(Welded Vertical Assembly)들로 구성되어 있다. 또한 측면지지를 위해 주변 지지링과 하부와 상부 끝의 끝판(End Plates)이 설치되어 있다. 5개의 주변 지지링은 용접골격(Welded Ribs) 전체 길이에 걸쳐 부착되어 있다.

노심슈라우드 외경부분과 노심지지통 사이에는 작은 공간이 형성되어 있으며 이 환형공간을 따라 냉각재가 위로 흐르게 함으로서 노심슈라우드에 가해지는 열응력을 최소화 한다.

노심슈라우드 상단에는 경화처리 된 4개의 정렬러그(Alignment Lugs)가 90°간격으로 설치되어 있는데, 이는 상부안내구조물몽치(Upper Guide Structure Assembly)와 노심슈라우드 그리고 하부지지구조물(Lower Support Structure)간의 정렬을 위해 사용된다.



CORE SHROUD

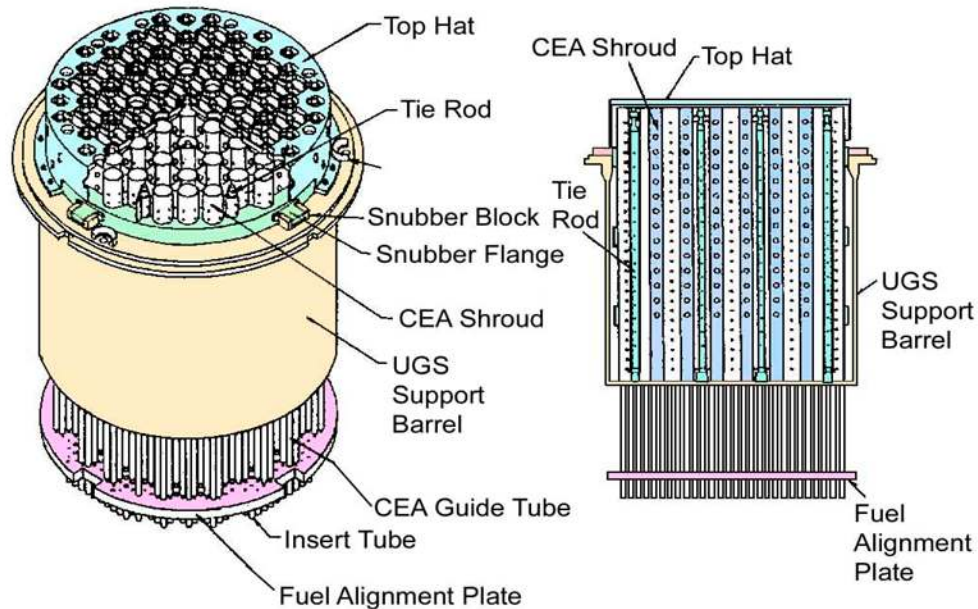
[그림 2-19] 노심슈라우드집합체와 하부지지구조물

나. 상부안내구조물(Upper Guide Structure)

상부안내구조물 집합체는 연료집합체 상단을 측면으로 지지하고 이를 정렬시키며, 제어봉 이동공간을 형성한다. 또한 정상운전 중 핵연료집합체를 눌러주어 설계기준사고 시 핵연료집합체가 위로 밀리지 않도록 해줄 뿐만 아니라 상부공동(Upper Plenum)에서 냉각재의 반경방향흐름(Cross Flow)에 의한 제어봉의 손상을 방지한다.

상부안내구조물집합체는 상부안내구조물지지통(USG Support Barrel), 제어봉안

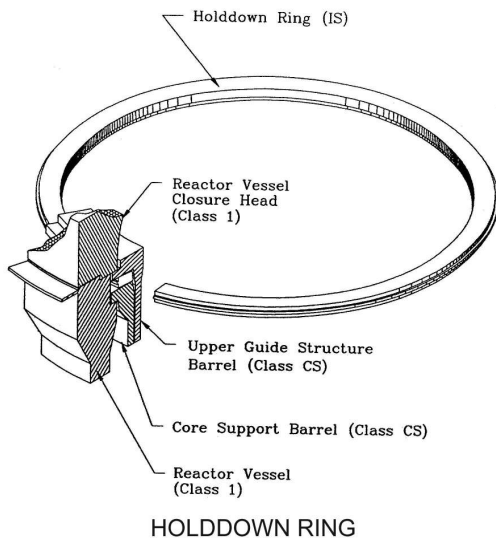
내튜브(CEA Guide Tube) 및 연료정렬판(Fuel Alignment Plate) 등으로 구성되어 있다. 상부안내구조물지지통은 상부 끝에서 링 플랜지(Ring Flange)에 용접되고, 하부 끝에서 원형관(UGS 바닥판)에 용접된 수직원통이다.



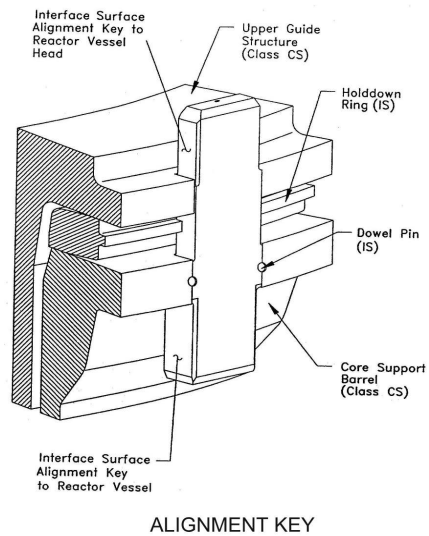
[그림 2-20] 상부안내구조물집합체

(1) 플랜지(Flange)

하부플랜지는 상부안내구조물 전체 무게를 지지하며, 하부플랜지 상부는 정상운전 중 압력용기 헤드부분을 차지하게 된다. 플랜지의 하부는 노심지지통 상부플랜지에 안착되는 홀다운링(Holddown Ring)에 의해 지지된다. 상부안내구조물플랜지와 홀다운링은 4개의 90°간격으로 정확히 가공된 키 홈(Keyway)에 노심지지통의 정렬키(Alignment Keys)를 정확히 정렬시킨다. 이 키(Key)와 홈(Slot)들은 상부헤드와 일치되어 제어봉구동장치(CEDM)가 노심과 정확히 정렬되도록 한다.



[그림 2-21] 홀다운링



[그림 2-22] 노심지지통정렬키

(2) 제어봉슈라우드집합체

제어봉슈라우드관은 핵연료다발 홀다운장치의 상향력을 감당해 내는데, 상향력은 정렬판으로부터 제어봉슈라우드튜브를 통해 상부안내구조물지지통 바닥판에 전달된다. 제어봉슈라우드뭉치는 냉각재의 반경방향흐름(Cross Flow)을 제한하고 제어봉뭉치들을 서로 분리시키는 기능을 가지고 있다.

이 뭉치는 격자구조로 된 수직판(Vertical Plates)으로 연결된 큰 수직관(Vertical Tubes)들의 조합으로서 상부안내구조물 바닥판에 부착되어 있다. 또한 이 뭉치는 12개의 연결봉장치(Tie Rod Tube Assembly)에 의해 지지, 고정되는데 연결봉장치는 그 하부가 상부안내구조물바닥판에 용접되어 있고 노심슈라우드뭉치의 상단 끝 부위에 볼트 조임 된다. 이 봉(Tubes)들과 연결판(Connecting Plates)에는 유체의 통과를 위해 수많은 구멍들이 가공되어 있다.

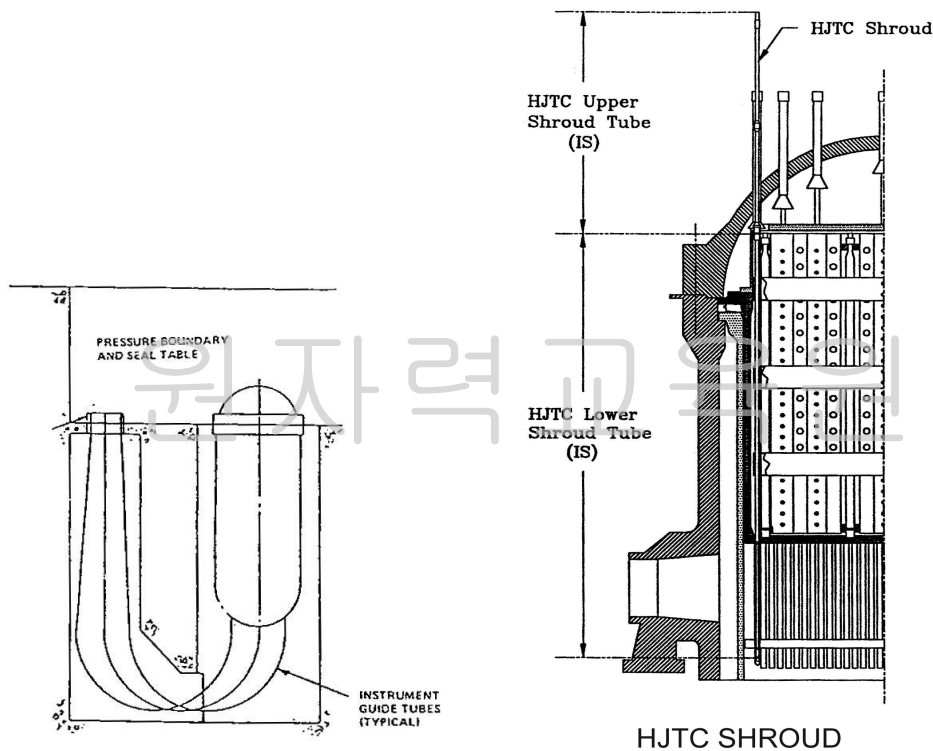
제어봉 연장축(CEA Extension Shafts)의 안내를 위해 안내구조물지지장치(GSSS : Guide Structure Support System)가 있다. 홀다운 링은 상부안내구조물뭉치(Upper Guide Assembly)와 노심지지구조물(Core Support Structure)이 유체의 유동력에 의해 축 방향으로 움직이는 것을 제한 해준다. 홀다운 링은 압력용기와 용기 가장

자리 영역의 내장물 사이에 일어나는 차동 열팽창(Differential Thermal Expansion)에 적응할 수 있도록 설계되어 있다.

(3) 연료정렬판(Fuel Alignment Plate)

연료정렬판(Fuel Alignment Plate)은 핵연료 상부에 위치한 제어봉슈라우드관(Control Element Shroud Tubes)의 아래 부분에 정렬되도록 설계되어 있다. 또한 연료 정렬판의 외측 가장자리 부분에는 균등하게 위치한 4개의 홈(Slots)이 있어 노심슈라우드의 스텔라이트 경화러그(Stellite Hardfaced Lugs)와 맞추어져 정렬된다.

다. 노내계측기 안내통로 및 지지장치



[그림 2-23] 노내계측기 안내통로

[그림 2-24] 열전대(HJTC) 안내통로

노내 중성자속 감시설비는 자체동작(Self-Powered) 노내 계측장치, 안내관 및 안내관지지물, 감지신호를 위한 증폭기 등으로 구성되어 있다. 노내계측기 안내통로 및

안내관지시물은 압력용기 외부에서 시작되어 용기바닥을 관통한 후 핵연료다발 상부 끝까지 이어진다. 각 노내계측기는 전 길이에 걸쳐서 안내되는데, 외부 안내관(External Guide Tube) → 압력용기 → 하부지지구조물의 노내핵계측노즐 → 핵연료다발의 계측기 안내관으로 구성된 통로가 확보되어 있다.

각 계측기의 압력경계는 원자로 외부에 있는 밀봉하우징(Seal Housing)이며, 여기에서 외부의 전기적 장치와 연결된다. 감지기 및 열전대는 보호관(Sheath Tube)으로 피복되어 있는데, 보호관은 감지기나 열전대가 냉각재와 직접 접촉되는 것을 방지해 주는 방벽역할을 하며 압력경계로 작용한다. 밀봉하우징테이블에는 밀봉마개(Seal Plug)가 설치되어 노내계측설비의 건전성을 유지시켜 주며 신호케이블이 이것을 통과하도록 되어 있다. 운전압력에 견딜 수 있는 고정형 O-링 밀봉이 사용된다.

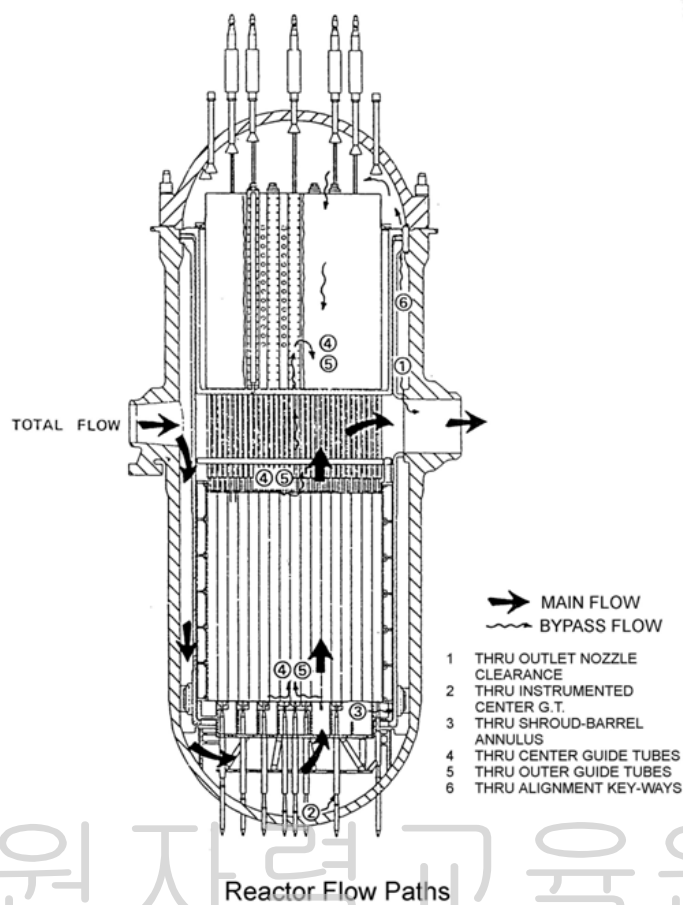
4. 냉각재 유량

가. 열제거 유량

4개의 원자로용기 입구노즐로 들어가는 설계최소 냉각재유량은 330,000gal/min ($1.249 \times 10^6 \text{ L/min}$)이다. 전 출력 상태에서 노심설계에 사용되는 1차 계통 설계최대 냉각재유량은 1차 계통 설계 최소 냉각수 유량상태의 110%이다. 노심유량의 최소 설계치는 1차 냉각수 최소 설계유량으로부터 노심우회유량의 최대 설계치를 공제한 값으로 320,000gal/min ($1.211 \times 10^6 \text{ L/min}$)이다. 원자로용기에서 주 냉각재 유로는 원자로용기와 노심지지 배럴 사이의 환형 공간 아래에서 시작하여 유량배분환(Flow Skirt)을 지나 노심지지대 구역 및 원자로심 내부를 지나서 핵연료 정렬판을 통하여 2개의 원자로 냉각수 출구노즐로 나간다.

나. 우회 유량(Bypass Flow)

주 냉각재흐름 중 일부분이 주 유로(Main Flow Path)를 벗어난다. 이 우회유량의 일부는 주 냉각재유로가 아닌 구역에 있는 원자로 내장품을 냉각시키는 동시에 제어봉집합체(CEA)들을 냉각하고 있다. <표 2-4>는 우회유로와 이 통로를 통한 전체 원자로용기 유량에서의 분율을 나타낸다. 열 관계 계산은 전 원자로용기 유량의 3%의 설계최대 우회유량을 여유 있는 수치로 사용한다.



[그림 2-25] 주 냉각재유로 및 우회유로

<표 2-4> 우회 유로에서의 설계 원자로냉각재 유동

우회 경로	경로 번호	총 용기 유동률(%)
출구노즐 간격	1	1.21
정열기 홈	6	0.95
노심슈라우드환형 공간	3	0.21
계기 부착된 중앙안내관	2	0.06
계기 없는 중앙안내관	4	0.16
코너 안내관	5	0.41
총 우회 유량	전부	3.00

[핵심요약]

1. 원자로의 기능

- 연료를 장전하여 출력생산영역제공, 제2방벽역할, 원자로내장설비지지, 냉각재흐름의 안내역할

2. 원자로 내에서 유체의 흐름 경로

- 원자로용기입구노즐 → 원자로용기와 노심지지통사이의 하향유로 → 유량분배환 → 하부공동 → 하부지지구조물의 유량분배구멍 → 연료다발 → 상부안내구조물의 연료정렬판의 유량구멍 → 원자로용기출구노즐

3. 원자로용기 상부헤드 형상

- 돔과 플랜지로 구성, 84개의 관통부, 54개의 스테드볼트로 원자로용기에 고정, 탄소강재질에 오스테나이트계 스테인리스로 내부피복

4. 원자로용기 하부헤드 형상

- 원자로용기몸체에 용접설치, 45개의 핵계측기용관통관, 유량분배환, 6개의 노심멈춤쇠가 용접설치

5. 원자로용기 몸통의 형상

- 플랜지 안쪽에 턱 가공, 6개의 노즐, 6개의 Stabilizing Lug 설치, 6개의 감시시편용기설치

6. 원자로헤드와 용기의 밀봉

- 용기와 플랜지사이에 2개의 오리링밀봉장치 설치, 두개의 오리링사이에 누설탐지계통설치, 오리링은 은도금한 인코넬 재질, 오리링은 속이 빈 구조, 오리링은 특수클립으로 고정

7. 노심지지통 형상

- 상부플랜지는 외부링형, 하부플랜지는 내부링형, 6개의 스너버 설치, 우회유량최소화 출구노즐 설치

8. 하부지지구조물 형상

- Fuel Assembly, Core Shroud 및 ICI Nozzle의 위치구속 및 지지역할, Bottom Plate는 Flow의 압력 분포가 균일하게 하는 역할, ICI Nozzle 및 Support System지지, Beam에 설치된 Fuel Pin은 핵연료 위치를 안내하며 연료가 Stock되지 않게 함

제3절 연료집합체

[학습목표]

1. 연료집합체의 기능을 설명할 수 있다.
2. 연료집합체의 각 구성품의 기능을 설명할 수 있다.
3. 원자로 장전모형에 대해 설명할 수 있다.

1. 기능

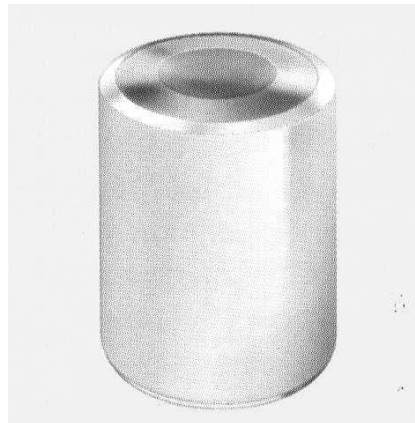
원전연료집합체는 연료봉 지지 및 위치 고정을 위하여 적절한 공간이 유지되도록 함으로써 어떠한 조건하에서도 노심냉각이 가능하도록 기하학적 형상을 유지시키고, 제어봉 삽입 및 인출시의 과도한 접촉마모를 방지하며 노내 중성자속 감시설비와 중성자선원을 지지하기 위하여 사용된다.

2. 주요 구성품

가. 연료봉

(1) 펠렛

연료 펠렛은 저농축 이산화우라늄(UO_2) 분말의 조그만 원통형이며, 펠렛의 양단면은 약간 접시모양(dishing)으로 오목하게 되어 있어서 사용 중에 펠렛의 중앙부에 열팽창이 생기는 것을 흡수한다. 펠렛간의 오정렬시 펠렛 모서리가 피복재를 손상시키는 것을 방지하고, 연료에서 방출되는 핵분열 기체의 압력이나 피복재와 연료의 열팽창 차이 또는 연소할 때 생기는 연료의 밀도변화 때문에 과대한 응력이 피복재에 가해지는 것을 피하기 위하여 펠렛의 모서리는 모따기



[그림 2-26] 펠렛 형상

처리(chamfered)가 되어 있다.([그림 2-26 참조])

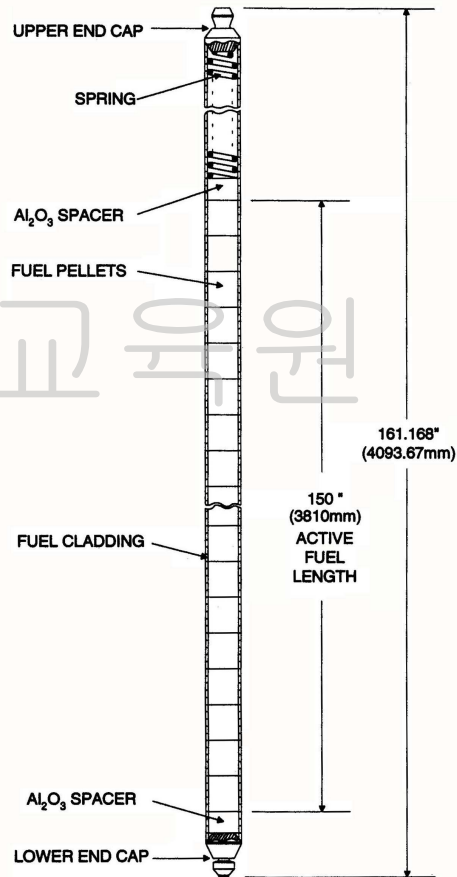
펠렛은 저농축 이산화우라늄 분말을 가압 형성하여 1700℃에서 12시간 정도 소결(Sintering)하여 평균밀도는 이론밀도(10.96gr/cm³)의 약 95%이다. 이러한 평균밀도는 펠렛 내에 기공이 존재하도록 하여 기체를 잡아두며, 정상 운전 중 핵분열성 기체의 75%는 펠렛 기공에 존재하고 25%는 펠렛과 연료봉 간격 내에 수용한다.

(2) 스페이서 펠렛

펠렛의 상·하부에는 열전달률이 낮은 산화 알루미늄 재질의 스페이서 펠렛이 삽입되며, 상부 스페이서 펠렛은 압축스프링과 펠렛간의 직접 접촉을 방지하여 펠렛 조각 이탈이나 균열발생을 예방하고 연료봉내에 조각 발생시에는 상부 공동부(Upper Plenum)로의 유입을 방지해준다. 하부 스페이서 펠렛은 하부 봉단마개의 가열을 감소시켜 봉단마개 용접부위의 열응력을 줄인다.

연료봉은 [그림 2-27에 표시된 바와 같이 지르칼로이-4 재질의 피복관에 저농축 이산화우라늄의 원통형 펠렛, 상부에 스테인레스강으로 만든 코일 스프링 및 상·하부에 알루미늄 스페이서(Al_2O_3 Spacer)를 넣고 양단에 지르칼로이-4의 봉단마개를 용접한 밀봉 구조로 헬륨(He) 기체로 가압을 한다.

연료봉내의 코일 스프링은 연료를 노심에 장전 전 취급시나 운송시에 피복관 내에서 펠렛이 이동하는 것을 방지할 목적으로 넣고 연료봉내를 헬륨 기체로 가압(약 26.7kg/cm²)하는 것은 원자로 냉각재의 수압으로 인한 피복관 내·외의 차압에 의



[그림 2-27] 연료봉 구조

해 발생하는 압축응력이나 Creep를 감소시키기 위해서이다. 운전시의 이상과도 변화시를 포함하여 연료봉 내압은 수명기간 중 외압을 초과하지 않으며 또한 외압에 의하여 평탄화(Flattening)가 일어나지 않도록 설계된다.

연료봉 상부의 공동부는 펠렛의 축방향 열팽창을 수용하기 위한 공간을 제공하고 누름 스프링을 수용하며 연료봉 내압의 수용 가능한 범위를 보장하기 위한 공간을 제공한다. (초기에 주입된 헬륨 및 방출되는 핵분열기체를 수용)

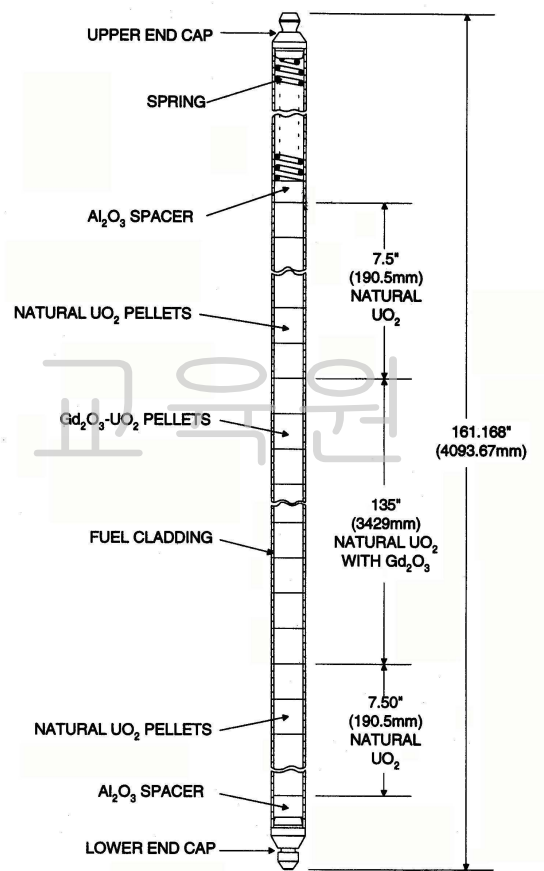
연료 펠렛, 피복관 및 연료봉 관련 주요 제원은 <표 2-5>과 같다.

나. 독물질봉

노심수명 초기에 감속재 온도계수의 정(+)반응도의 크기를 줄이고, 제어봉 인출시 안내관 내로 냉각재 유입으로 인한 국부적인 출력증가를 발생시키는 현상(Water Hole Peaking)을 감소시키기 위해 천연우라늄(UO_2)과 가연성중성자 흡수 물질(Gd_2O_3)을 혼합한 독물질봉([그림 2-28] 참조)이 일부 연료집합체에서 몇 개의 연료봉과 대체된다.

독물질봉 펠렛($Gd_2O_3 - UO_2$)의 Gd_2O_3 농축도는 4 ~ 6w/o이고 직경과 길이는 연료봉의 펠렛과 동일하며, 독물질봉 전체길이는 연료봉과 동일하나 유효 독물질봉 길이는 3429mm(135")이다. 독물질봉의 상·하부 190.5mm(7.5")에는 천연우라늄(UO_2) 펠렛이 들어 있다.

독물질봉 관련 주요 제원은 [표 2-6]와 같다.



[그림 2-28] 독물질봉 구조

<표 2-5> 펠렛, 피복관 및 연료봉 관련 주요 제원

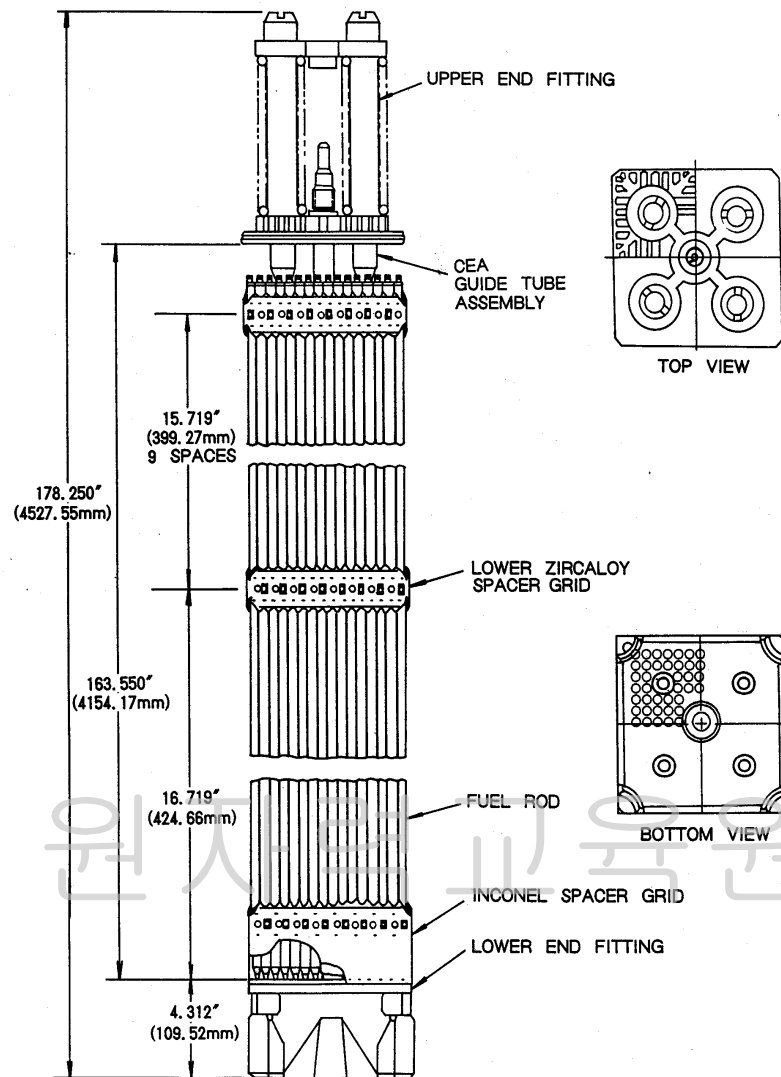
항 목		제 원
연료 펠렛	재 질	UO ₂
	직경, cm(inch)	0.826(0.325)
	농축/천연우라늄 - 길이, cm(inch)	0.991/1.27(0.390/0.500)
	밀도, gr/cm ³	10.44
	이론밀도, gr/cm ³	10.96
	밀도, 이론밀도 %	95.25
	적층(Stack height) 밀도, gr/cm ³	10.152
	무게, gr	5
피 복 관	재 질	지르칼로이-4
	외경, cm(inch)	0.97(0.382)
	내경, cm(inch)	0.843(0.332)
	두께, cm(inch)	0.0635(0.025)
	직경 갭, cm(inch)	0.01778(0.007)
연 료 봉	전체 길이, cm(inch)	409.36(161.168)
	유효 길이, cm(inch)	381.01(150.1)
	플레넘 길이, cm(inch)	24.20(9.527)
	무게, kg	약 2.6

<표 2-6> 독물질 혼합 펠렛, 피복관 및 독물질봉 관련 주요 제원

항 목		제 원
독 물질 혼합 펠렛	재 질	$Gd_2O_3 - UO_2$
	직경, cm(inch)	0.826(0.325)
	길이, cm(inch)	0.991(0.390)
	밀도, 이론밀도 %	95.25
	UO_2 이론밀도, gr/cm ³	10.96
	Gd_2O_3 이론밀도, gr/cm ³	7.41
피 복 관	재 질	지르칼로이-4
	외경, cm(inch)	0.97(0.382)
	내경, cm(inch)	0.843(0.332)
	두께, cm(inch)	0.0635(0.025)
	직경 갭, cm(inch)	0.01778(0.007)
독물질봉	전체 길이, cm(inch)	409.36(161.168)
	유효 길이, cm(inch)	342.9(135.0)
	플레넘 길이, cm(inch)	24.15(9.507)

다. 원전연료집합체

한국표준형 원전용 표준형 연료집합체의 구조는 [그림 2-29]에 표시되어 있으며 연료집합체는 16×16의 정방배열을 형성하는 연료봉 및 독물질봉 236개, 제어봉 안내관 4개, 노내핵계측관 1개, 지지구조물로서 지지격자 11개, 상단고정체 1개 및 하단고정체 1개로 구성되어 있다.



[그림 2-29] KSNP용 표준형 연료집합체 구조

노내핵계측관은 집합체의 중심에 배치되며, 제어봉 안내관은 연료의 노심위치에 따라 65개의 전강도 제어봉 집합체(Full Strength Rod Assembly) 및 8개의 부분강 제어봉 집합체(Part Strength Rod Assembly)와 2개의 중성자 선원봉(Neutron Source Rod)이 삽입된다.

연료집합체는 4개의 제어봉 안내관 및 1개의 노내핵계측관과 여기에 접합된 11

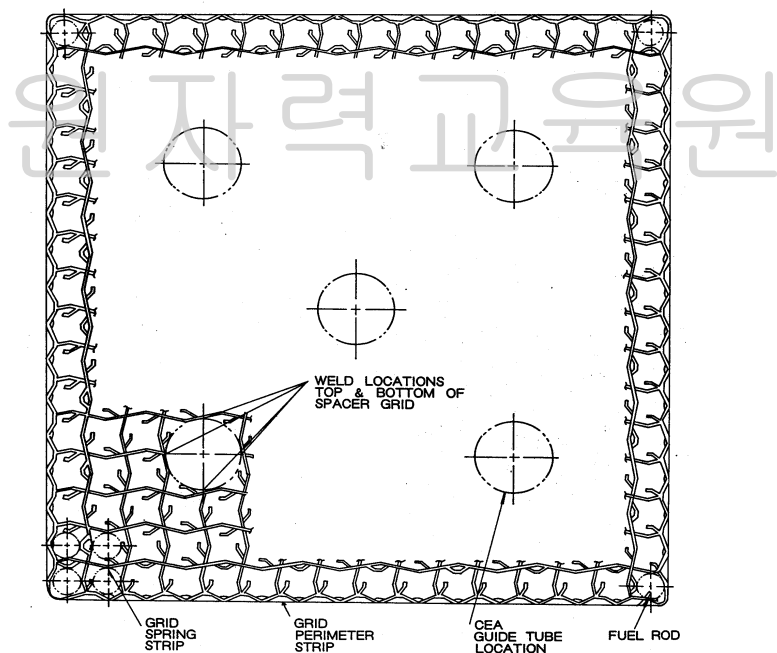
개의 지지격자로서 골격을 형성하고, 연료봉을 삽입한 후 상·하단고정체를 장치하여 조립한다.

연료봉 상단과 상단고정체 사이에는 틈을 만들어 연료봉의 열팽창이나 성장을 허용할 수 있는 구조로 되어 있다.

연료집합체는 연료봉 이외에 지지격자, 안내관 및 상·하단 고정체 등의 주요부품으로 구성되어 있으며 관련 제원은 <표 2-8>와 같다.

(1) 지지격자(Spacer Grid)

지지격자는 연료봉의 횡방향 움직임을 구속하고, 축방향 움직임을 마찰력으로 억제함으로써 연료봉 배열을 유지시킨다. 지지격자 각 셀에는 2개의 판 스프링과 4개의 아아치(Arch)가 설치되어 있다.([그림 2-30] 참조) 판 스프링은 아아치 쪽으로 봉을 밀어 지지격자와 연료봉 사이의 상대운동을 구속하는 역할을 한다. 지지격자 외곽 판재는 연료 재장전작업중 인접 지지격자와의 걸림을 방지하기 위한 설계특성을 가지고 있다.



[그림 2-30] 지지격자 구조

10개의 지르칼로이-4 지지격자들은 안내관 표면과 접촉하는 곳 가운데 8개 지점에서 각각의 안내관에 용접된다. 최하단 지지격자(인코넬)는 재료가 다르므로 안내관에 용접되지 않고, 인코넬-625 스커트에 의해 지탱된다. 스커트는 최하단 지지격자와 하단고정체의 외곽면에 용접이 된다.

지지격자와 최하단 지지격자의 제원은 <표 2-7>과 같다.

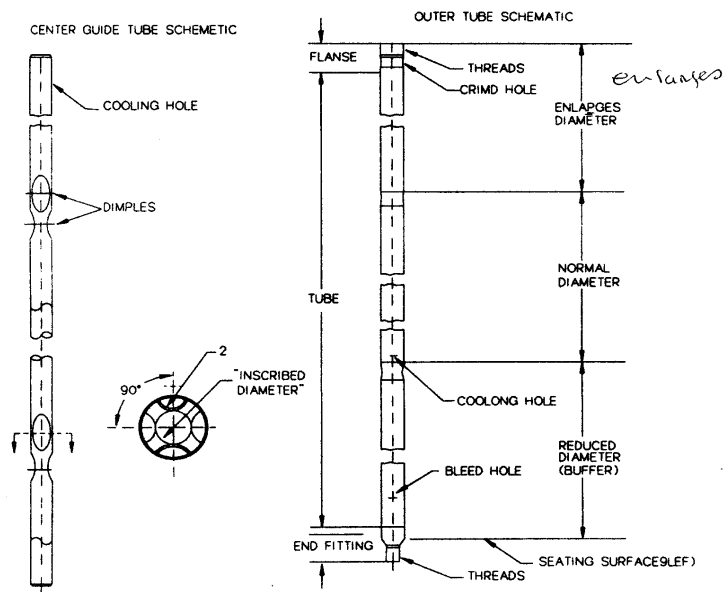
<표 2-7> 지지격자 및 최하단 지지격자 제원

항 목	지지격자	최하단 지지격자
형 태	판 스프링	판 스프링
재 질	지르칼로이-4	인코넬-625
연료집합체당 수	10개	1개
개당 무게	0.907kg(2.0 lbs)	1.452kg(3.2 lbs)
크기 : 가로×세로	20.25×20.25cm(7.972×7.972")	20.25×20.25cm(7.972×7.972")

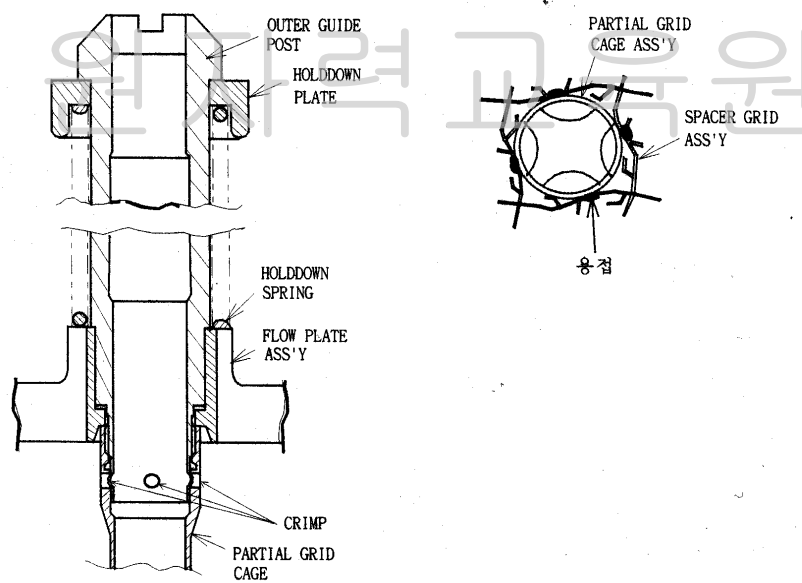
(2) 안내관

외측 안내관은 하부로 갈수록 직경이 작아지도록 설계([그림 2-26] 참조)되어 제어봉이 삽입될 경우에 기계적 충격을 줄여주며, 중앙 안내관은 상·하단 고정체의 소켓과 슬리브(Sleeve)에 끼워 맞춤되어 있다.

4개의 외측 안내관(Outer Post)과 상단 고정체 연결은 안내봉이 하부 구조판 구멍을 통과하여 안내관 상단의 내부나사와 체결되어 수행되고 크림프(Crimp)에 의해 잠궜진다.([그림 2-29] 참조) 각 안내관 하단에 가공된 지르칼로이-4 너트와 체결되고 스테인레스강 잠금링(Locking Ring)을 사용함으로써 고정된다.



[그림 2-31] 중앙안내관 및 외측안내관



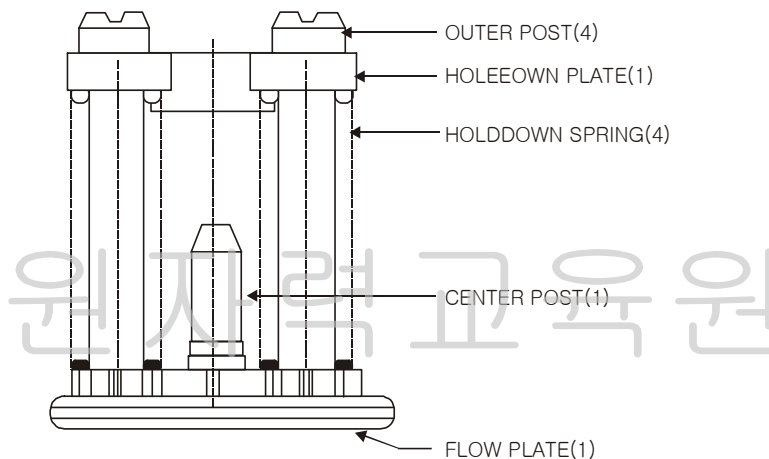
[그림 2-32] 안내관과 상단 고정체의 연결부위

(3) 상·하단 고정체

(가) 상단 고정체(상부 엔드피팅 : Upper End Fitting)

상단 고정체는 2장의 주조 스테인레스강 판, 4개의 외측 봉(Outer post), 4개의 인코넬 코일 스프링 및 1개의 중앙 봉으로 구성되어 안내관들에 부착됨으로써 연료집합체를 정렬시킨다.([그림 2-33] 참조)

하부 주조판은 안내관 상단에 위치하여 연료봉의 과도한 상·하 이동을 방지하고 상부 주조판(누름판)은 코일 압축스프링과 함께 누름장치(Holddown Device)를 구성하여 스프링에 의해 관판의 아래쪽에 힘을 가한다. 스프링이 상부에 위치하므로 스프링 힘은 노심통(Core Barrel)과 냉각재 유량에 의한 상향력 및 연료집합체 중량에 조화되어야 한다.



[그림 2-33] 상단 공정체 구조

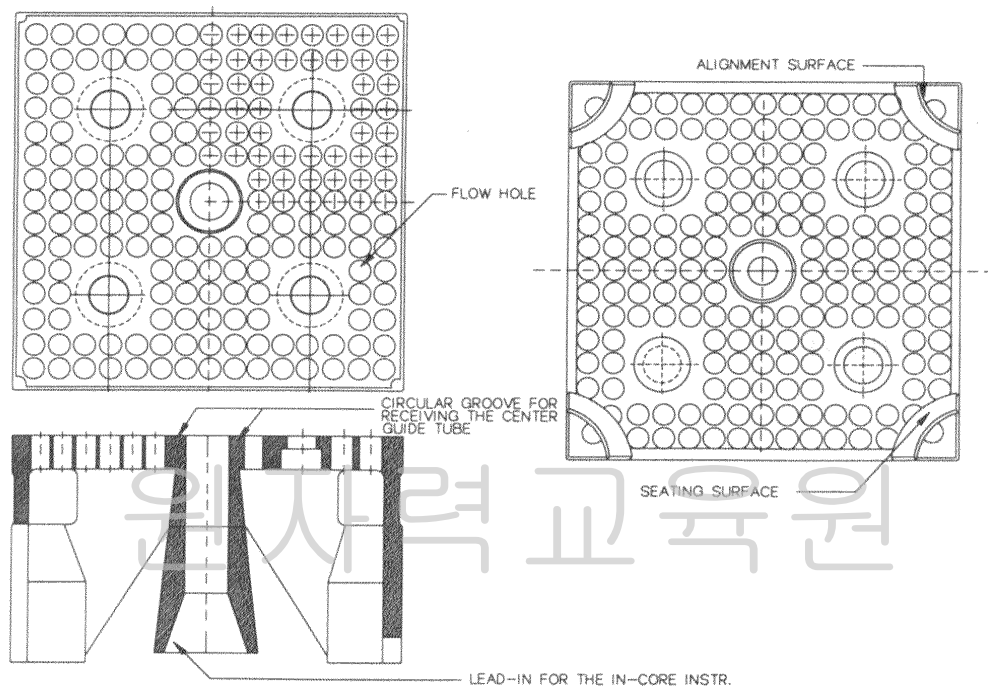
(나) 하단 고정체(하부 엔드피팅 : Lower End Fitting)

하단 고정체는 유로구멍들이 있는 판과 네 귀통이의 지지다리로 구성된 스테인레스강 구조물로서, 노심 지지구조물(Core Support Structure)의 정렬핀들이 네 귀통이에 끼워지고, 중앙봉은 유량판 중심에 나사로 고정된다. 하단 고정체의 슬리브는 고정체의 중앙봉 연장으로서 고정체와 중앙 안내관 사이에 특별한 연결장치는 없다.

연료봉 및 독물질봉을 수평지지하고 수직 방향힘에 의한 굽힘을 방지하여 그

리드와 피복재 사이의 접촉마모를 감소시키기 위해 스페이서 그리드가 사용되며, 리프 스프링(Leaf Spring)은 연료봉이나 독물질봉을 아아치(Arch)로 밀어서 그리드와 봉간의 상대운동을 제한한다.

인코넬-625는 1,000°F 이하에서 연성과 강도가 좋고 부식저항이 높으며 방사선 조사에 안정하고 또한 스테인레스강에 용접이 가능하기 때문에 최하단 스페이서 그리드 재질로 사용되어 하단 고정체에 용접되었다.



[그림 2-34] 하단 고정체 구조

<표 2-8> 원전연료집합체 제원

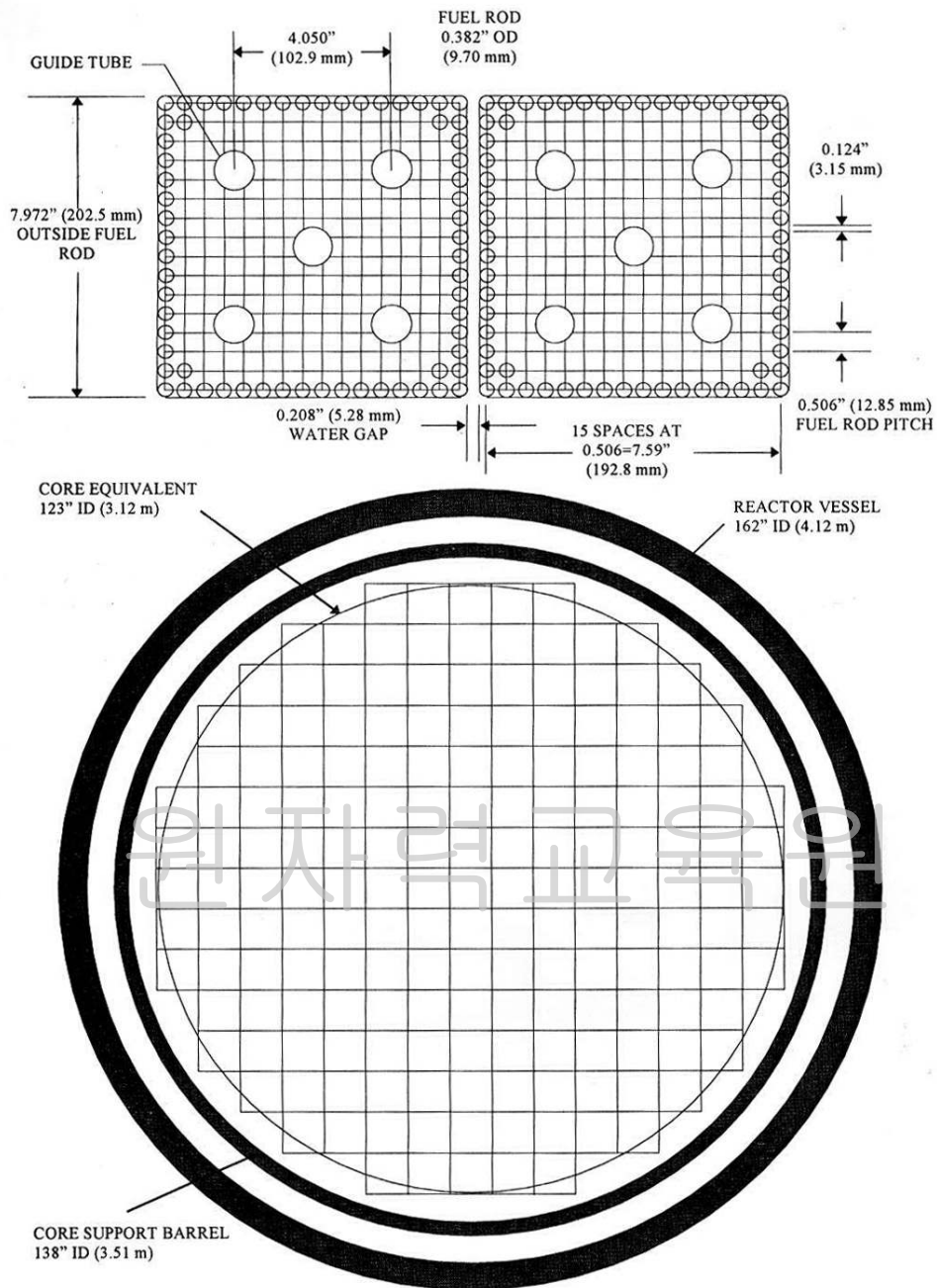
항 목	제 원
연료형태	표준형 16×16
연료봉 수, 개	236
지지격자 수, 개	10(지르칼로이-4)
	1(인코넬-625) : 최하단 지지격자
제어봉 안내관, 개	4
노내핵계측관, 개	1
집합체 전체길이, cm(inch)	452.755(178.250)
하단 고정체 높이, cm(inch)	10.952(4.312)
집합체 폭, cm(inch)	20.25×20.25(7.972×7.972)
집합체 무게, kg(lbs)	651.4(1436)

라. 원자로심

원자로심은 177다발의 연료집합체가 장전되며 연료집합체는 312cm(123")의 등가 직경과 381cm(150")의 유효 연료길이를 갖는 정원형에 가까운 실린더형으로 배열된다.([그림 2-35] 참조)

1주기 노심은 4배치 형태로서 초기노심으로부터 평형노심으로의 변이가 용이하고 기존의 3배치 장전모형과 비교하여 초기노심 연료의 이용률을 향상시킨다. 초기노심은 또한 저누설 장전모형(Low Leakage Loading Pattern)으로서 연료집합체 내에서 첨두출력을 감소시키고 연료집합체간 제어봉 휨 등에 의한 출력분포의 변화를 감소시켰다. ([그림 2-36] 참조)

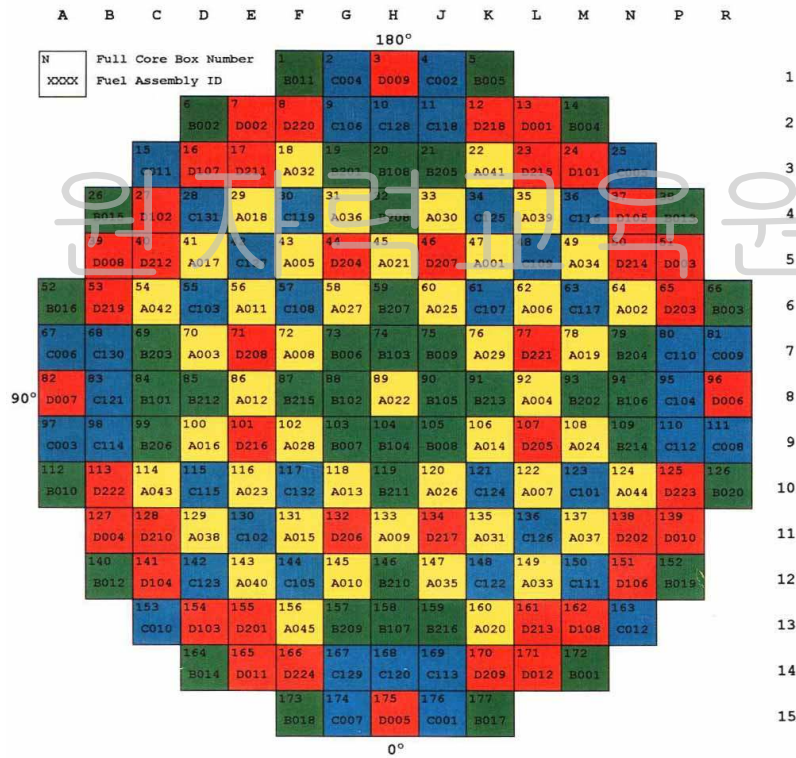
다양한 농축도 영역과 독물질봉의 이용으로 초기노심에서 연료집합체는 5가지 상이한 농축도(0.711, 1.29, 2.35, 2.90, 3.34 w/o)의 연료봉을 사용하고 연료봉과 독물질봉의 배치형태에 따라 9가지의 상이한 배치로 구성된다.([표 2-8] 및 [그림 2-34]참조)



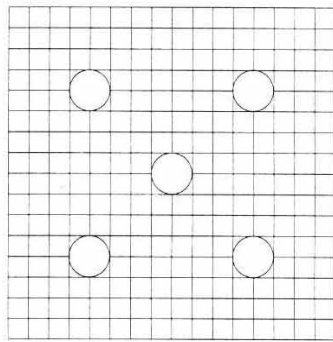
[그림 2-35] 원자로심 단면도 및 연료집합체 제원

[표 2-9] 초기노심 연료집합체 장전 현황

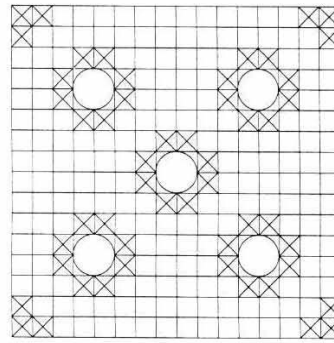
연료집합체 형 태	수 량	U-235 농축도(w/o)	연료집합체 당 연료봉수	연료집합체당 독물질봉 수	Gd ₂ O ₃ 농축도(w/o)
A	45	1.29	236	—	—
B	20	44	2.35	236	—
B1	8		2.36 / 1.28	176 / 52	8
B2	16		2.36	232	4
C	12	44	2.90 / 2.36	184 / 52	—
C1	32		2.90 / 2.35	176 / 52	8
D	12	44	3.34 / 2.87	184 / 52	—
D1	8		3.33 / 2.85	176 / 52	8
D2	24		3.33 / 2.90	128 / 100	8
—	177	—	—	—	—



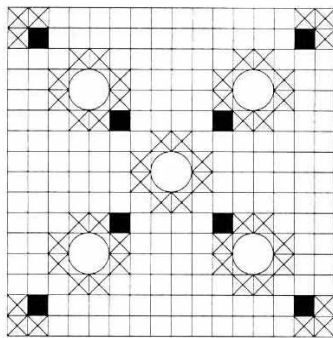
[그림 2-36] 일반적인 초기노심 장전모형



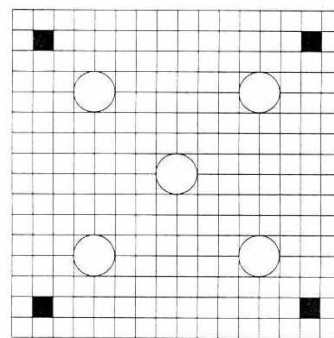
A, B



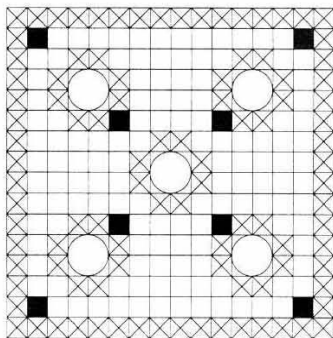
C, D



B1, C1, D1



B2



D2

-  WATER HOLE
-  NORMAL FUEL PIN
-  LOWER ENRICHMENT FUEL PIN
-  GADOLINIA-BEARING FUEL PIN

[그림 2-37] 연료집합체에서 연료봉과 독물질봉의 배치형태

[핵심요약]

원전연료집합체는 연료봉 지지 및 위치 고정을 위하여 적절한 공간이 유지되도록 함으로써 어떠한 조건하에서도 노심냉각이 가능하도록 기하학적 형상을 유지시킨다. 저농축 이산화우라늄 펠렛이 들어있는 연료봉은 중성자 흡수능이 낮은 지르코늄 합금인 지르카로이-4 또는 ZIRLO를 사용한다.

연료봉의 건전성 확보를 위하여

- 펠렛 양 단면 접시모양 제조(Dishing) 및 가장자리 모따기 처리(Chamfered)
- 연료봉내 헬륨(He) 가압
- 펠렛 최상, 하부 스페이서 펠렛 사용
- 이물질 유입방지용 보호지지격자 사용

원자로심은 177다발의 연료집합체가 장전되며 연료집합체는 312cm(123")의 등가직경과 381cm(150")의 유효 연료길이를 갖는 정원형에 가까운 실린더형으로 배열된다. 초기노심은 저누설 장전모형(Low Leakage Loading Pattern)으로서 연료집합체 내에서 침투출력을 감소시키고 연료집합체간 제어봉 휨 등에 의한 출력분포의 변화를 감소시켰다.

원자력교육원

제4절 제어봉집합체

[학습목표]

1. 원자로 출력 제어를 위한 설비에 대해 설명할 수 있다.
2. 제어봉 집합체의 구성품에 대해 설명할 수 있다.
3. 제어봉을 분류하고 기능을 설명할 수 있다.

1. 기능 및 설계기준

가. 기능

제어봉 집합체는 반응도 제어와 원자로 정지능력을 갖춘 움직이는 독물질로서 다음과 같은 기능을 가진다.

- 어떠한 상태에서도 단기 반응도 제어를 수행한다.
- 원전연료와 원자로 내장설비내에 제어봉 집합체 삽입공간을 마련하여 제어봉 집합체를 적절히 위치시킴으로써 원자로를 확실하게 정지시킨다.
- 방사선 조사로 인해 반응도 제어기능에 손상이 가서는 안된다.

나. 설계기준

제어봉 집합체는 중성자 흡수체의 연소, 인코넬 625 재질의 허용능력, 연료집합체 안내관의 제어봉과의 간격 등을 고려하여 10년의 수명을 갖도록 설계되었다.

제어봉 집합체의 중성자 흡수물질인 B-10은 중성자와의 반응으로 인해 헬륨이 발생되고 일부 헬륨기체가 제어봉내의 공간(Plenum)으로 이탈되는데 이는 온도의 함수이며 다음사항들이 고려되어야 한다.

- 초기 충전기체 압력
- 기체 온도
- 방출되는 헬륨 기체량
- B₄C의 기공을 포함한 가용체적

2. 주요 구성품

가. 제어봉 집합체

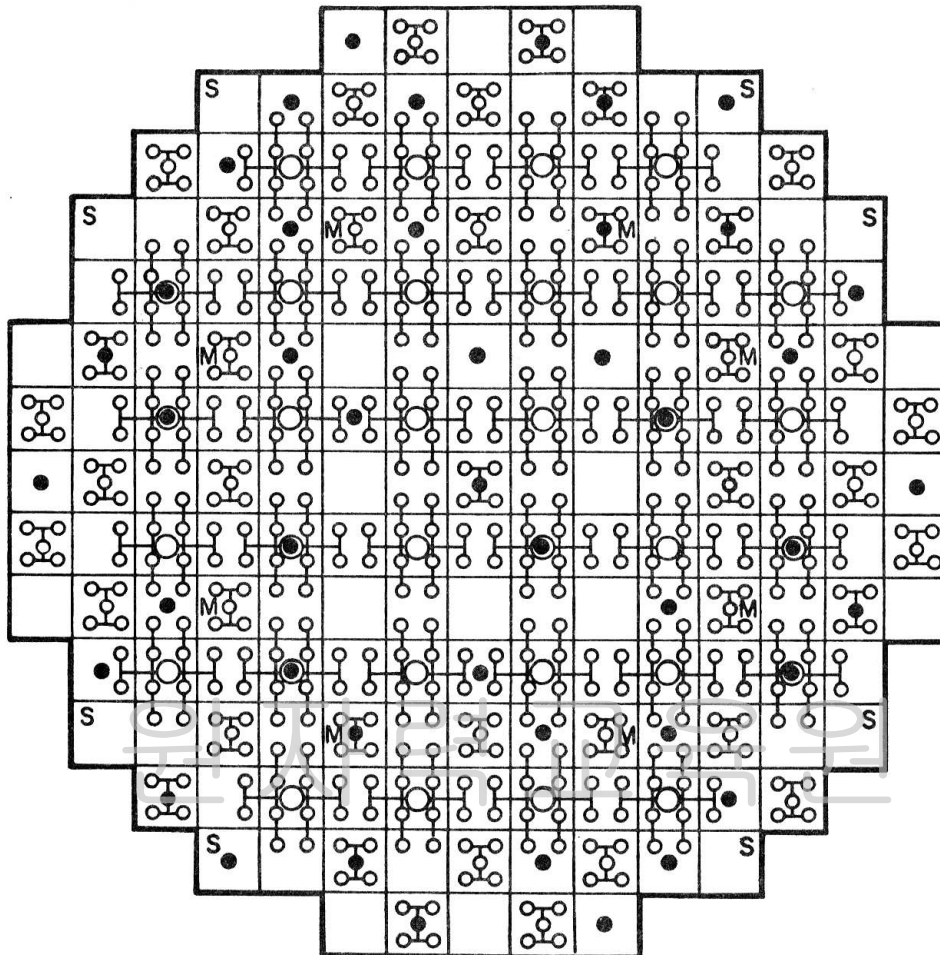
제어봉 집합체는 2가지 유형으로서 12개 봉(12 Rods) 구조의 전강도(Full Strength) 제어봉 집합체가 32개, 4개 봉(4 Rods) 구조의 제어봉 집합체가 41개, 총 73개의 제어봉 집합체가 있다. 12개 봉 제어봉 집합체 32개 중 28개는 정지그룹에 속해 있고, 나머지 4개는 조절그룹에 속해 있다. 한편 4개 봉 구조의 제어봉 집합체 중 전강도용 33개는 조절그룹에 속해 있고, 부분강(Part Strength) 제어봉 8개는 부분강 제어그룹에 속해 있다.(<표 2-10> 참조) 기존 73개의 제어봉 집합체 이외에 8개의 제어봉 집합체가 추가로 설치될 수 있도록 설계되었다.

[표 2-10] 제어봉 집합체 구분

Group	Sub-group	CEA 종류						계	비 고
		12 Rods			4 Rods				
Shutdown A, B	7개	A	12개	28개	-			28개	-
		B	16개						
Regulating 1~5	9개	1	4개	4개	1	8개	33개	37개	-
		2	-		2	8개			
		3	-		3	8개			
		4	-		4	5개			
		5	-		5	4개			
Part Strength P1, P2	2개	-			P1	4개	8개	8개	축방향중성자속 분포조정
					P2	4개			
계	18개	32개			41개			73개	-

12개 및 4개 봉의 전강도 제어봉 집합체는 총길이가 642.541cm(252.969")이며, 제어봉 자체의 길이가 621.348cm(244.625")로서 하부로부터 65 ~ 70%는 중성자 흡수 물질이 내장되어 있다.(<표 2-11> 참조) 제어봉 피복재는 인코넬-625로서 슬리브와 잠금너트(Locking Nut)에 의해 상부 거미발(Spider)에 부착되어 있다. 이 거미발은 그

리퍼 커플링(Gripper Coupling)에 의해 제어봉 집합체 연장축에 부착되어 자력식 인양 장치(Magnetic Jacking Device)에 의해 상·하 이동이 가능하다.



177 FUEL ASSEMBLIES

73 CEA's AND CEDM's

8 MANEUVERING CEA's

(M)

8 ADDITIONAL LOCATIONS FOR SHUTDOWN CEA's

(S)

45 FIXED RHODIUM IN-CORE NEUTRON DETECTOR STRINGS (●)

[그림 2-38] 원자로심내 제어봉 집합체 위치

<표 2-11> 제어봉 집합체 제원

항 목		전 강	부분강
제어봉 집합체 수, 개		65	8
제어봉 집합체의 제어봉 수, 개		12 및 4	4
제어봉 * 펠렛직경감소 영역	형태	원통형 봉	원통형 봉
	독물질	B ₄ C	인코넬-625 슬러그
	독물질 길이, cm(inch)	344.17+31.75* (135.5+12.5)	378.46(149)
B ₄ C 펠렛 ** 제어봉 하부	직경, cm(inch)	1.872 / 1.687** (0.737 / 0.664)	—
	이론밀도, gr/cm ³	2.52	—
	밀도, 이론밀도 %	73	—
	봉소, w/o	77.5	—
인코넬-625 슬러그	직경, cm(inch)	—	1.872(0.737)
	밀도, gr/cm ³	—	8.442

(1) 전강도 제어봉 집합체(Full Strength Rod Assembly)

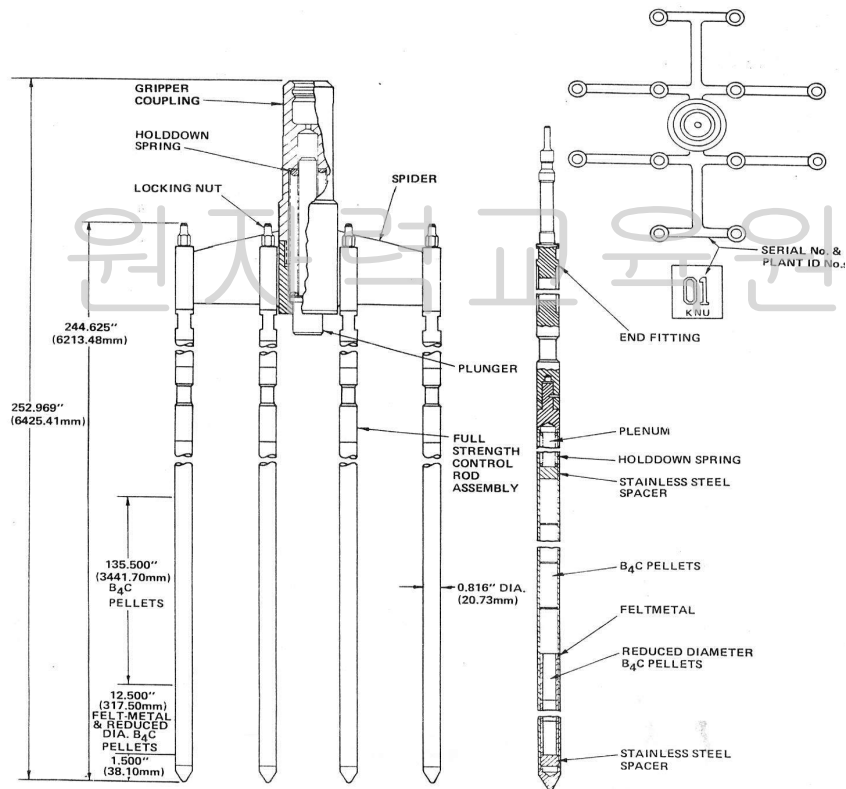
전강도 제어봉 집합체에서 사용되는 독물질은 B₄C이며, 펠렛 직경은 1.872cm (0.737")이다. 또한 펠렛은 모따기 처리되어 열팽창 및 방사선 조사시 부풀음(Swelling)으로 인한 펠렛간 결집(Binding)을 방지하도록 되어 있다. 독물질 부분의 하부에서는 펠렛 직경이 감소되어 부풀음을 최소화시키고 금속-펠트(Metal-Felt) 슬리브를 삽입시킬 수 있는 공간을 제공해준다. 이 금속-펠트 슬리브는 펠렛과 피복재간의 열팽창 차이와 펠렛의 부풀음을 흡수하여 피복재에 미치는 응력을 제한한다.

제어봉 하단 부분에는 스테인레스강의 스페이서(Spacer)가 위치하여 용접 부위에 대한 응력을 최소화시키고, 상부의 스페이서는 누름 스프링(Hold Down Spring)과 공동을 분리시키는 역할을 수행한다. 독물질봉 상부에는 공간을 두어 B₄C로부터 방출되는 헬륨기체에 대한 팽창체적을 제공하고, 이 공간에는 스테인레스강 누름 스프링이 설치되어 흡수체와 피복재간의 팽창차이는 허용하는 반면에 흡수체와 피복재간의

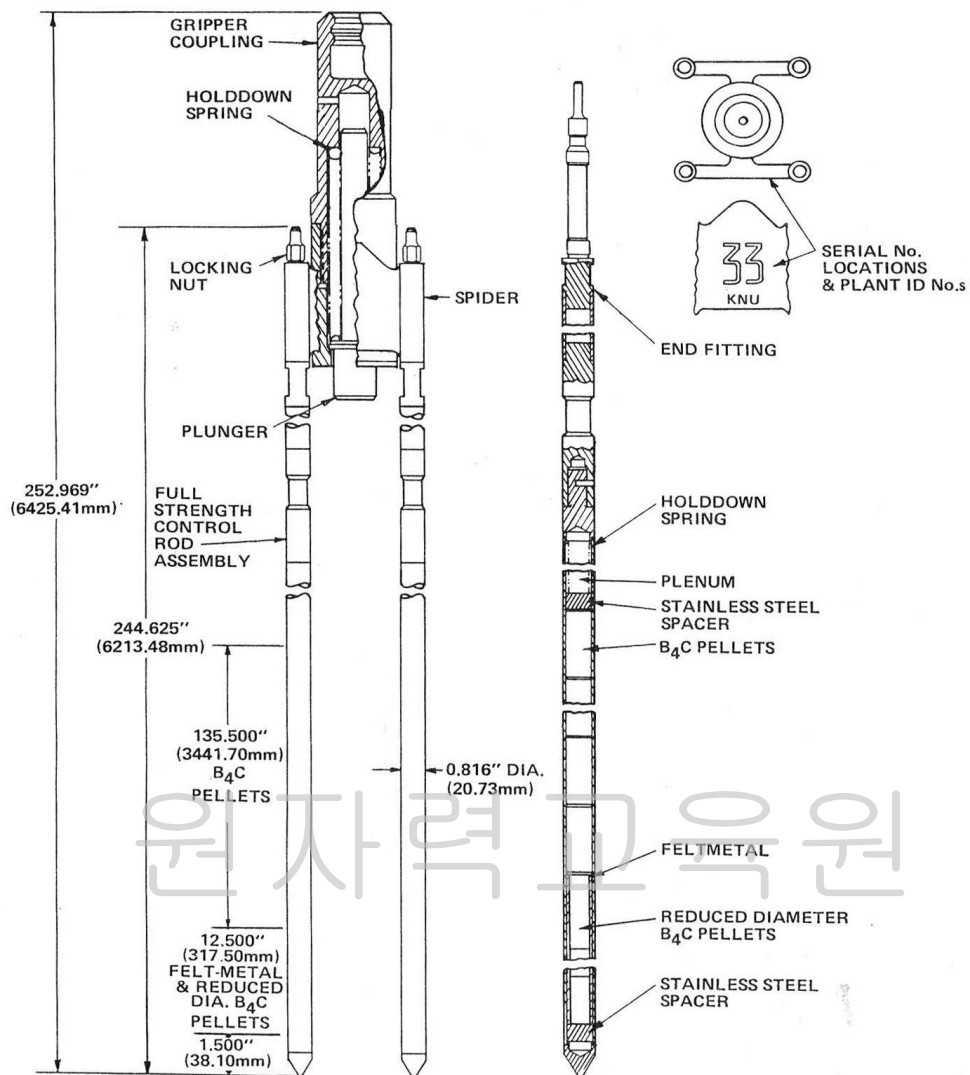
수직변화는 제한하여 선적 및 취급시 흡수체의 위치를 유지하도록 해준다.

각 전강도 제어봉은 피복재관 하단의 인코넬 노우즈 캡(Nose Cap)이 연결되고 상부는 인코넬 625 재질의 연결부위에 용접, 밀봉되어 엔드피팅(End Fitting)을 형성한다. 엔드피팅은 제어봉을 지지하도록 거미발에 너트로 부착되며 거미발의 중앙구멍은 제어봉 집합체 연장축에 부착되도록 가공되었다.([그림 2-39, 40] 참조)

제어봉 안내관의 마모를 감소시키기 위해 제어봉은 연료집합체 상부 엔드피팅 끝의 삽입부와 잘 정렬되어야 한다. 제어봉 집합체들은 제어봉 쉬라우드관 안에 내장되어 노심출구 공동부위의 횡류(Cross Flow)로부터 보호되며, 제어봉 안내관의 우회 유량을 감소시켜 제어봉 진동을 최소화시킨다. 또한 안내관과 상부 엔드피팅봉의 내경을 슬리브 삽입길이 만큼 확장시켜 슬리브 삽입이 제어봉 낙하(원자로 정지)에 영향을 주지 않도록 하였다.



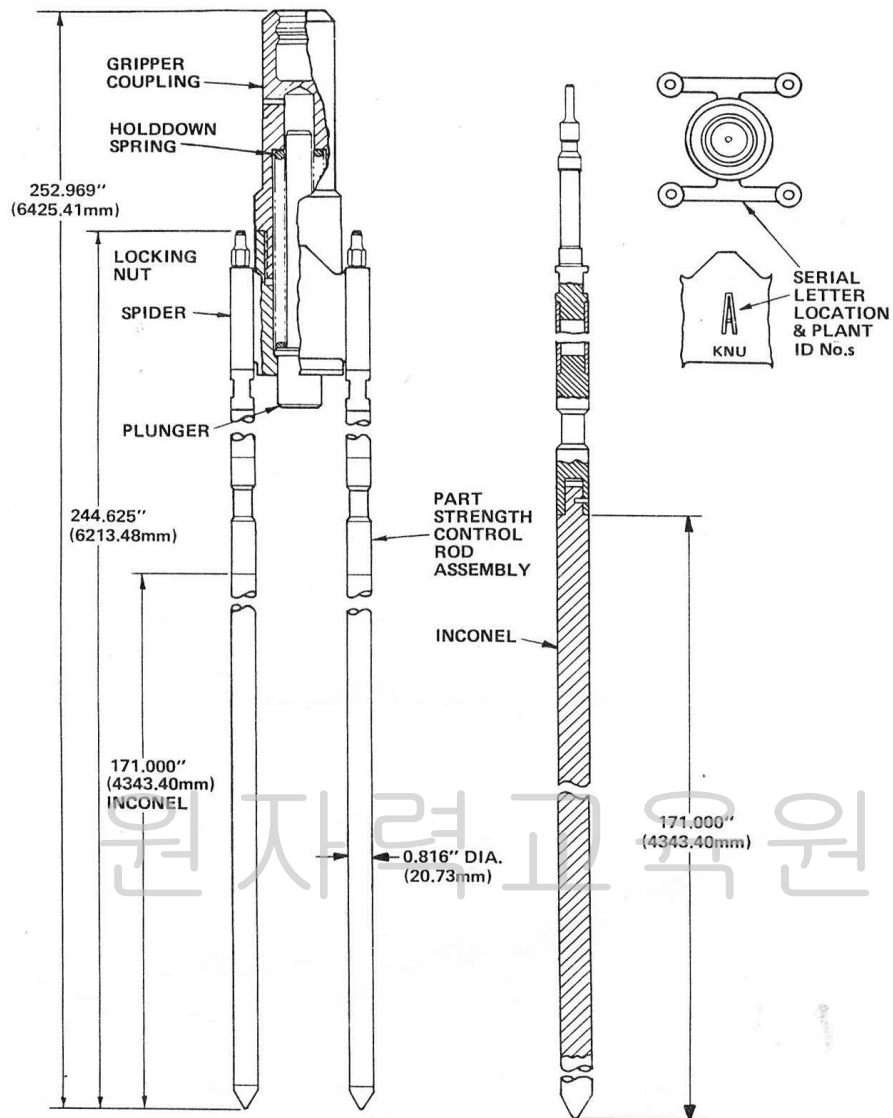
[그림 2-39] 전강도 제어봉 집합체(12개 봉) 구조



[그림 2-40] 전강도 제어봉 집합체(4개 봉) 구조

(2) 부분강 제어봉 집합체(Part Strength Rod Assembly)

부분강 제어봉 집합체의 독물질을 약 흡수체인 인코넬 625가 하부에 사용되고, 중앙의 인코넬은 중앙과 측면에 구멍이 가공되어 냉각재가 통과함으로써 강흡수체기능을 하도록 하였다.([그림 2-41] 참조)

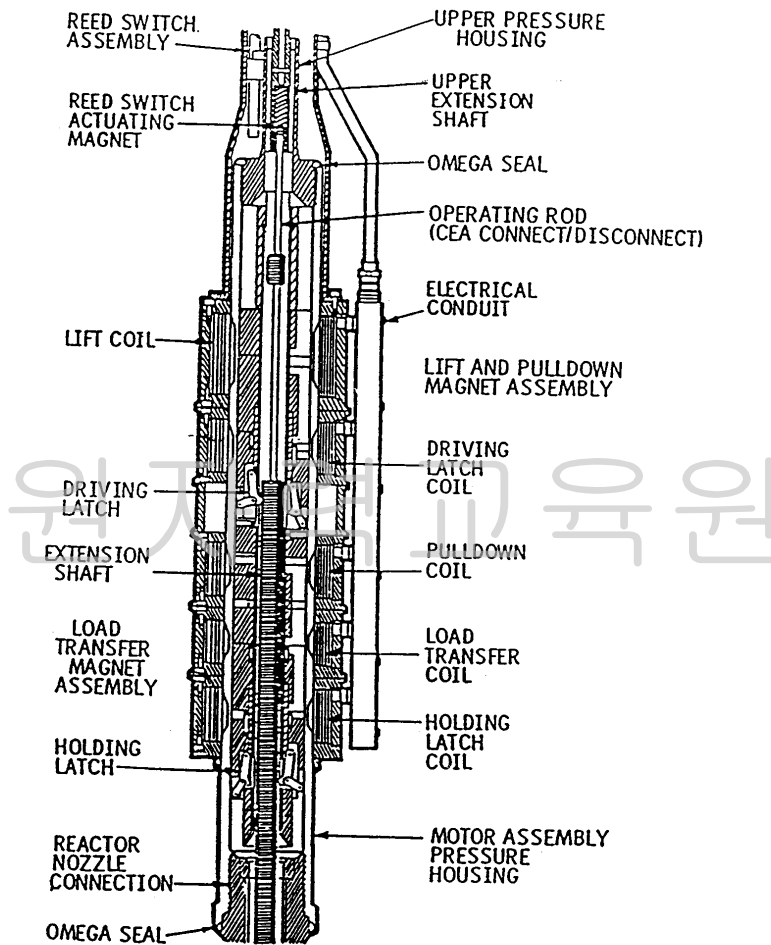


[그림 2-41] 부분강 제어봉 집합체 구조

나. 제어봉 구동장치(Control Element Drive Mechanism)

제어봉 구동장치는 자력식 인양구조(Magnetic Jack)로 되어 있으며 제어봉 집합체를 노심내에서 수직 이동시키거나 일정 위치에 멈추도록 한다. 각 구동장치는 유효 노심길이 범위내에서 인출, 삽입, 유지, 낙하 기능을 수행할 수 있다.

제어봉 구동장치는 원자로 용기 헤드 위의 노즐에 설치되며 압력 하우징, 전동설비, 코일 뭉치, 위치지시 스위치(Reed Switch) 뭉치, 연장축 뭉치 등으로 구성되고 구동력은 제어봉 구동장치 하우징을 둘러싼 코일 뭉치에 의해 공급된다. 2개의 위치지시 스위치는 상부 압력 하우징 쉬라우드에 의해 지지되고 제어봉 구동장치 압력 하우징은 원자로 냉각재계통 압력경계의 일부로서 원자로 용기와 같은 내압요건을 갖춘다. ([그림 2-42] 참조)



[그림 2-42] 제어봉 구동장치

(1) 제어봉 구동장치 압력 하우징

전동기 하우징 뭉치와 상부 압력 하우징 뭉치로 구성되며, 전동기 하우징 뭉치는 원자로 용기 헤드노즐에 나사 체결과 용접하여 부착되며, 모든 제어봉 구동장치 작동은 하우징 상단으로부터 작동되므로 제거될 필요가 없다. 상부 압력 하우징 뭉치는 제어봉 구동장치를 둘러싸며 배기용 구멍이 있고, 전동기 하우징 뭉치 상단에 나사 체결되어 용접되어 있다.

(2) 전동설비

전동기 하우징 속에 장착되어 제어봉 집합체를 수직 이동시키는 역할을 하며, 래치(Latch) 안내관과 상·하부 래치들로 구성된다. 상·하부상 래치는 제어봉 구동장치를 단계별로 작동시키는데 사용되고, 제어봉 집합체를 이동시킬 필요가 없을 경우에는 상부 래치가 현위치를 유지시킨다. 상·하부 래치는 수직으로 각각 1.111cm(7/16")와 0.9525cm(6/16")를 이동시키며, 한 싸이클당 제어봉 집합체의 이동은 1.905cm(3/4")이다.

(3) 코일 스택뭉치(Coil Stack Assembly)

전동기 하우징 뭉치 외부에 설치된 4개의 큰 직류 자기코일로 구성되며 이 코일들이 제어봉 집합체 연장축에 접속되어 구동하도록 래치들에게 자기력을 공급한다. 자기코일에 공급되는 전원은 2대의 전동기 발전기(M-G Set)로부터 오며, 제어봉 구동장치 제어계통(CEDMCS)이 상·하향 순차적 작동을 지시함으로써 정확한 제어봉 집합체 위치를 얻는다.

제어봉 구동장치는 다른 코일들을 모두 비여자시키고 상부래치 코일만 감소된 전류로 여자시킴으로써 제어봉 집합체를 현 위치에서 유지시킬 수 있다. 자기코일 전원 프로그램머로부터의 전기신호(Pulse)도 제어봉 집합체 위치지시 전송수단이 된다.

원자로 정지시에는 제어봉 구동장치 코일로부터 전원이 차단되어 연장축과 제어봉 집합체의 자중으로 연료집합체내로 제어봉 집합체가 낙하되며, 90% 삽입시까지의 낙하시간은 4초 이내이다. 연료집합체 외곽의 4개 안내관 하단에는 구배가 져서 직경이 감소됨으로써 제어봉의 낙하 끝 지점에서 속도를 줄여 완충되도록 하였으며, 여기에 제어봉 집합체 거미발의 플런저(Plunger)와 스프링이 완충효과를 증대시킨다. 완

전히 삽입될 경우에 제어봉 집합체는 상부 안내구조물 지지판에 놓여지게 된다.

(4) 연장축 뭉치(Extension Shaft Assembly)

제어봉 구동장치와 제어봉 집합체를 연결시켜 주는 스테인레스강 봉으로서, 위에는 위치지시 스위치를 작동시키는 영구자석 뭉치가 있고, 하단에는 제어봉 집합체에 연결되는 커플링 장치가 있으며, 중앙부분은 구동축이라고 한다. 구동축은 304 스테인레스강으로서 연장축에 나사와 편으로 연결이 되고 구동축 표면에는 1.905 cm(3/4") 간격으로 원주형 홈(Grooves)이 가공되어 있어 제어봉 구동장치와 연결이 되도록 하였다.

상단의 자석뭉치는 하우징, 자석, 플러그 등으로 구성되며, 2개의 원통형 자석이 사용된다. 이 자석뭉치가 위치지시 스위치를 작동시키며, 하우징 바닥에 플러그로써 설치된다.

원자력교육원

[핵심요약]

제어봉집합체는 움직이는 독물질로서 연료집합체의 안내관에 삽입되며, 어떠한 상태에서도 단기 반응도 제어를 수행하고 원자로를 확실하게 정지시킨다.

제어봉 구동은 자력식 인양장치(Magnetic Jacking Device)에 의해 상·하 이동이 가능하며, 원자로 정지 신호 발생시 인양장치의 전원을 차단하여 자중에 의해 원자로 노심으로 삽입되도록 설계되었다.

중성자 흡수 물질로는 주로 B_4C 가 사용되며 일부 제어봉(Part Strength)은 피복재와 동일 재질인 인코넬-625를 사용한다.

제어봉집합체는 분류는

- 정지그룹(Shutdown Group)
- 조절그룹(Regulating Group)
- 부분강 제어그룹(Part Strength) 등 3개의 그룹으로 분류된다.

특히 부분강 제어그룹은 원자로 정지나 출력제어 보다는 원자로 축방향 출력 분포(Axial Shape Index) 제어를 위해 사용된다.

원자력교육원

제3장 원자로 보조설비

제1절	화학 및 체적 제어계통	101
제2절	1차기기 냉각수계통	118
제3절	1차기기 냉각해수계통	134
제4절	연료저장 및 취급계통	143

제1절 화학 및 체적 제어계통

[학습목표]

1. 화학 및 체적제어계통의 기능과 도면을 통해 중요 구성설비의 기능과 동작을 살펴보고 원자로계통 운전과의 연계성을 이해하도록 합니다.

1. 개 요

화학 및 체적제어계통(Chemical and Volume Control System)은 원자로냉각재계통과 연결되어 발전소 기동, 정상운전 및 정지시에 매우 중요한 기능들을 수행하는 원자로냉각재계통의 보조계통이다. 원자로냉각재계통은 발전소 운전상태에 따라 냉각재계통내 물의 양, 온도, 압력, 붕소농도, 화학조건과 같은 변수들이 바뀐다. 이러한 운전변수들은 화학 및 체적제어 계통이라는 원자로냉각재 보조계통을 사용하여 운전상태별로 요구하는 값으로 조절된다. 화학 및 체적제어계통은 자신의 고유기능을 수행하기 위해서 원자로냉각재계통에서 냉각재 일부를 빼내어 체적제어탱크(Volumn Control Tank)로 보내는 유출계통(Letdown), 유출된 계통수를 정화하는 정화계통탱크에 저장된 유출수를 충전펌프의 동력을 이용하여 원자로냉각재 계통으로 되돌려 보내는 충전계통(Charging) 및 충전수의 일부를 이용하여 원자로냉각재펌프 축에 밀봉수를 주입하는 밀봉주입계통(Seal Injection)으로 구성되어 있다. 화학 및 체적제어계통의 주요 기능들을 살펴보면 아래와 같다.

가. 원자로냉각재계통(RCS) 재고량 유지

충전 및 유출유량을 조절하여 발전소 출력 준위에 따라 요구되는 가압기 수위를 제어함으로써 냉각재계통 내 재고량을 유지한다.

- (1) 잉여 냉각재 유출 : 발전소 기동 및 출력 증가시
- (2) 부족 냉각재 보충 : 발전소 정지 및 출력 감발시
- (3) 정상누설량 보충 : 원자로냉각재 및 보조계통에서 소량 누설 발생시

나. RCS 화학 및 순도유지

- (1) 용존산소 제거 : 하이드라진(N_2H_4) 또는 수소(H_2)를 사용하여 냉각재 내의 용존산소를 제거하여 부식을 방지한다.
- (2) pH 조절 : 냉각재 내 Li 농도를 조절하여 적정 pH를 유지함으로써 부식을 방지한다.
- (3) 수질 정화 : 여과기, 이온교환기를 사용하여 냉각재 내에 포함된 불순물, 입자, 핵분열생성물 등을 제거한다.

다. 붕산농도 제어를 통한 원자로 출력제어

원자로출력은 제어봉위치, 냉각재 온도 및 연료연소의 변화와 각종 독물질(제논 등)에 따라 영향을 받는다. 즉, 반응도에 따라 변화하는데 이러한 반응도를 제어하는 방법에는 제어봉위치 조절방법과 붕산농도를 조절하는 방법이 있다. 화학 및 체적제어 계통은 순수한 물 또는 고농도의 붕산수를 주입하여 원자로 냉각재계통의 붕산농도를 변화시켜 출력제어한다.

라. RCS 압력제어 보조(Aux Spray)

원자로냉각재펌프 사용불능시 화학 및 체적제어계통의 충전유량 일부를 공급하여 가압기 보조살수를 공급한다.

마. RCP 밀봉수 공급

고온·고압의 원자로냉각재가 냉각재펌프 축을 타고 외부 대기로 누출되는 것을 방지하기 위하여 냉각재의 압력보다 높은 저온·고압 충전수 일부를 RCP 밀봉부로 주입한다.

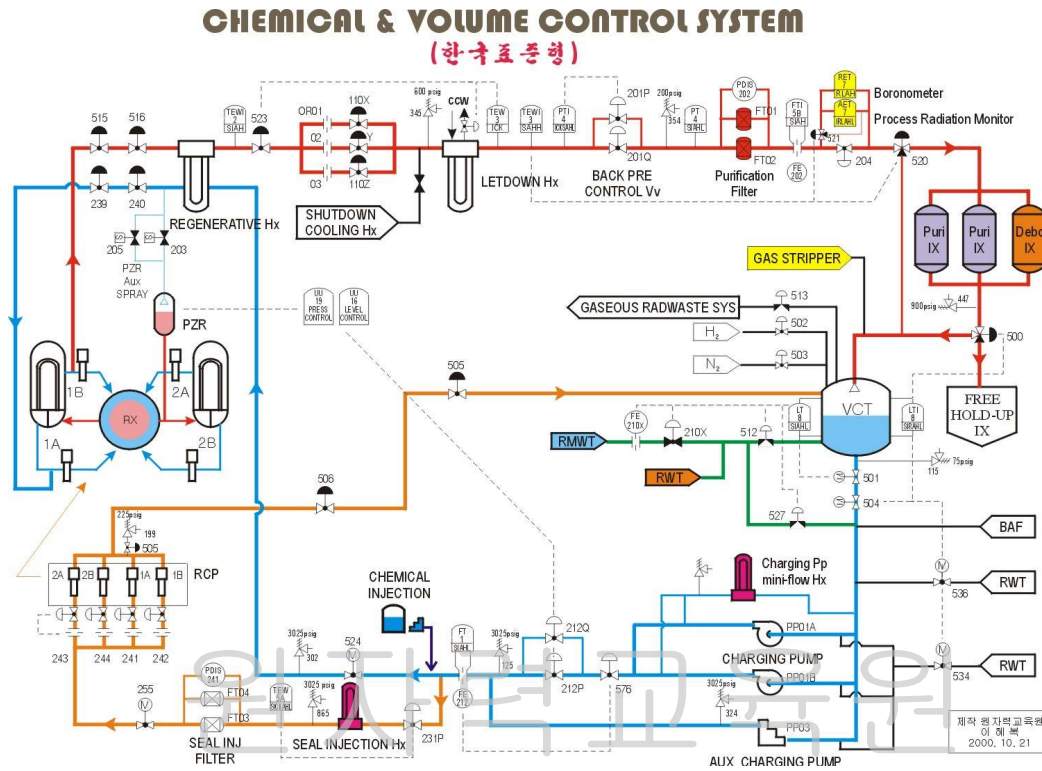
바. RCS 누설시험

충전펌프를 이용하여 원자로냉각재계통의 압력을 설계압력까지 가압한 후 일정 기간 압력을 유지하면서 가압기, 원자로 배수탱크, 격납건물 집수조, 체적제어탱크의 수위를 감시함으로써 원자로냉각재계통 누설 시험을 지원한다.

사. RCS 불활성 기체 제거

원자로냉각재 계통내에 존재하는 각종 기체들이 원자로냉각재계통을 돌아다니다

가 체적제어탱크 상부영역에 모이게 된다. 체적에어탱크 상부에는 배기관이 설치되어 있어 냉각재내 불활성 기체를 기체폐기물 처리계통으로 방출한다. 계통 전체 흐름도는 [그림 3-1]에 나타나 있다.



[그림 3-1] 화학 및 체적제어계통 흐름도

2. 구성기기

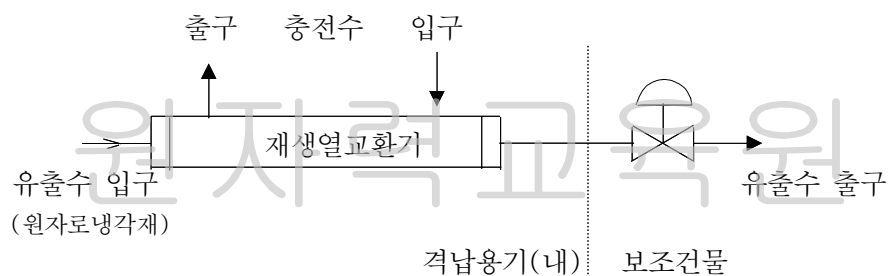
가. 유출 계통(Letdown System)

유출계통은 원자로냉각재계통의 저온관 1B에서부터 냉각재 일부를 추출하여 열교환기, 여과기 및 이온교환기 등을 거쳐 체적제어탱크로 가는데 여기서 원자로냉각재 연결관에서부터 체적제어탱크까지를 유출계통(Letdown)이라 한다. 화학 및 체적제어계통은 원자로냉각재 계통보다 낮은 온도 및 압력에서 운전되도록 설계되어 있으므로 먼저 원자로냉각재의 온도와 압력을 낮추는 기기들이 유출유로의 전단부에 설치되어

있다. 온도를 낮추는 기기로는 열교환기가 있다. 전단에 설치된 재생열교환기와 그 후단에 설치된 유출열교환기가 이에 해당한다. 압력이 떨어진 냉각재 유출수는 이를 저장하는 체적제어탱크로 들어가게 된다. 그러나 유출수는 체적제어탱크로 가기 전에 원자로냉각재의 수질을 정화하는 기기인 여과기와 이온교환기를 각각 거치게 된다.

(1) 재생열교환기(Regenerative Heat Exchanger)

재생열교환기는 유출수의 온도를 많이 낮추어야 하기 때문에 2단계의 열교환기를 사용하고 격납건물 내에 위치한다. 고온의 냉각재 유출수는 저온의 충전수에 의해 냉각되고 저온의 충전수는 고온의 유출수로부터 열을 회수하므로 원자로냉각재시스템의 열에너지를 보존하는 역할을 한다. 재생열교환기에 의해 예열된 충전유량은 원자로냉각재시스템 연결관 유입노즐의 열충격을 최소화하고 감속재 온도감소에 따른 정반응도 삽입효과를 방지한다. 재생열교환기는 정상운전상태 하에서 유출수 온도를 232℃이하로 유지토록 설계되었다. 정상운전시 유출유량은 약 72GPM, 충전유량은 약 62GPM이 각각 흐른다. 재질은 오스트나이트 스테인레스강으로 되어있다.

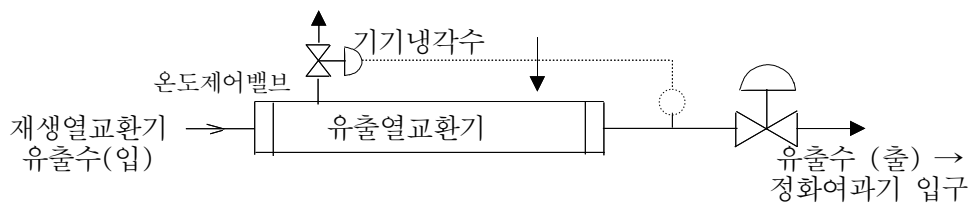


[그림 3-2] 재생열교환기

(2) 유출열교환기(Letdown Heat Exchanger)

재생열교환기에 의해 1차 냉각된 유출수는 재생열교환기 후단에 설치된 유출열교환기를 통과하게 된다. 유출열교환기는 수평으로 설치되어 있으며 동체측(Shell)으로 기기냉각수가 흐르고 튜브측(Tube)으로 유출수가 흐르면서 재생열교환기에서 냉각되어 나온 유출수를 정화계통 운전에 적합한 온도까지 냉각시킨다. 원자로냉각재속에는 각종 부식물 및 핵분열생성물이 있는데 이를 제거하기 위해서는 이온교환수지를 통과시켜야 한다. 이때 이온교환수지는 온도가 48.8℃ 이하에서만 사용하는데 이는 이 온

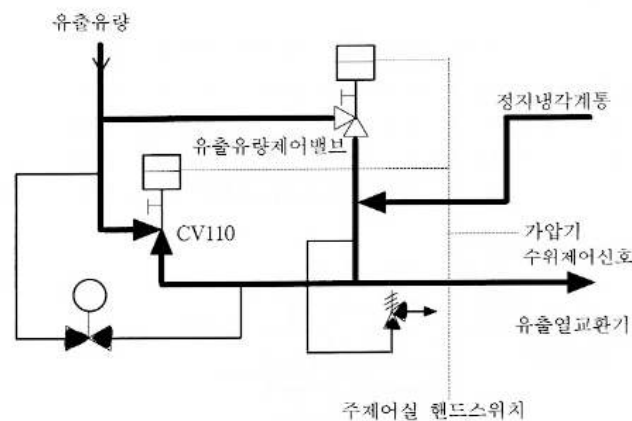
도 이상으로 가면 수지가 손상되기 때문이다. 따라서 유출열교환기 용량은 재생열교환기의 최대 출구온도 232.2℃로부터 이온교환수지의 정상운전 온도인 48.8℃이하까지 유출유량을 냉각시키도록 설계되었다. 튜브측으로 유출수가 흐르고 동체측으로는 기기 냉각수가 흐른다. 모든 재질은 오스테나이트 스테인레스강으로 되어있다.



[그림 3-3] 재생열교환기

(3) 유출유량제어밸브(CV-110P, 110Q)

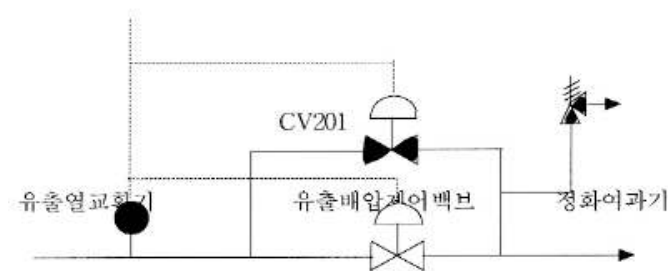
유출유량 제어밸브는 격납용기 차단밸브인 CV-523의 후단과 유출열교환기 전 단 사이에 병렬로 설치된다. 공기 구동형인 이 밸브는 가압기 수위제어계통으로부터 신호를 받아 밸브개도를 조절한다. 각 밸브는 최대 유출유량을 통과시킬 용량을 가지며 자동이나 수동제어로서 보통 하나가 사용된다. 자동일 경우에 각 밸브는 약 30~150gpm의 유량을 통과시키나 정상운전 압력에서 밸브제어기를 수동으로 하고 완전 개방시 약 165gpm의 유량이 흐를 수 있으며 또한 수동일 경우 완전히 닫을 수 있다.



[그림 3-4] 유출유량제어밸브

(4) 유출관 배압밸브(CV-201P, 201Q)

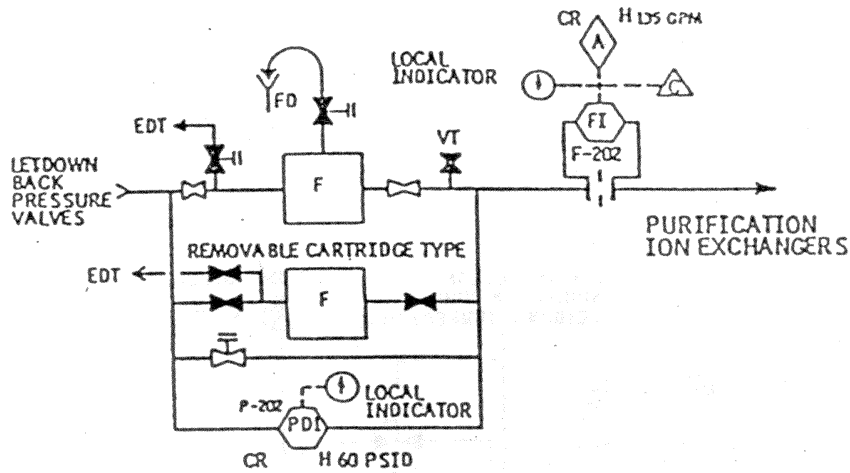
유출관 배압제어밸브들은 유출열교환기 후단에 병렬로 설치되어 보통 2개의 밸브 중 1개가 선택되어 운전되고, 전단압력을 29.7kg/cm^2 로 유지시켜 준다. 이 압력은 유출열교환기의 입구측 온도가 최대 설계온도(232°C)의 포화압력(물이 증기화)인 29.7kg/cm^2 이상으로 압력을 유지시킨다. 이렇게 포화압력 이상으로 압력을 유지시키는 목적은 유출열교환기로 공급되는 기기냉각수 상실후 열교환기는 재생열교환기에서 나온 고온 유출수에 의해 배관에서 물의 비등이 발생할 수 있다. 이러한 비등을 방지하여 유출유로에서 냉각재가 증기화(Flashng) 되는 것을 방지하는 기능을 한다.



[그림 3-5] 유출관배압제어밸브

(5) 유출수 정화여과기(Letdown Purification Filter)

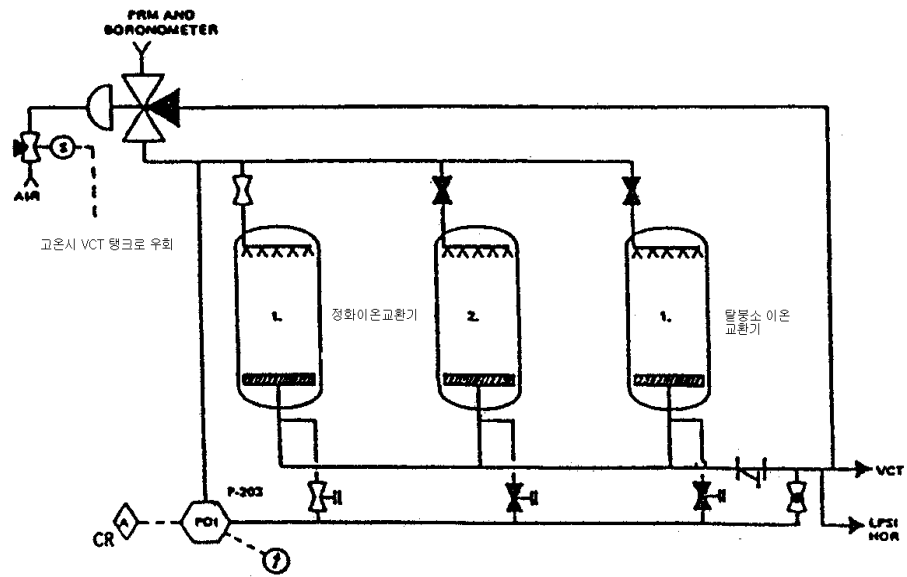
이 여과기는 배압 제어밸브 후단에 병렬로 2개가 설치되어 2μ 이상의 입자에 대해 98%의 여과효율을 갖고 있어 유출유량 중에 포함되어 있는 부유물질을 제거토록 설계되었다. 정상시 하나의 여과기만 사용되고 다른 하나는 수명이 다한 여과기 교체 를 위하여 예비로 남겨둔다.



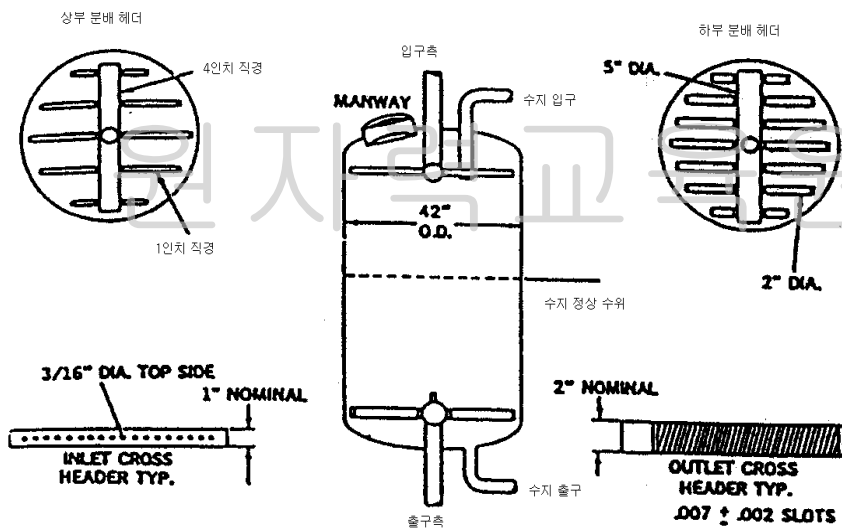
[그림 3-6] 유출수 정화여과기

(6) 이온교환기

원자로냉각재 유출수는 유출열교환기를 통과하면서 저온·저압의 상태로 되어 체적제어탱크로 가기 전에 3개의 이온교환기를 거친다. 이온교환기는 수직 원통형 탱크안에 좁쌀같이 생긴 수지(Resin)를 채워두고 있다. 3개중 2개는 정화용 이온교환기로 혼상이온교환수지가 채워져 있어 정상 유출수내 포함되어 있는 이온성 불순물과 방사성핵종을 연속적으로 제거하기 위하여 1개가 사용되고 다른 1개의 이온교환기는 원자로냉각재내 리치움 농도를 제어하기 위하여 사용되는데 연속적으로 사용되지 않고 필요시 간헐적으로 사용한다. 나머지 1대의 이온교환기는 노심말기에 붕소제거용으로 사용하여 폐기물생성을 최소화하도록 설계되어 있다.



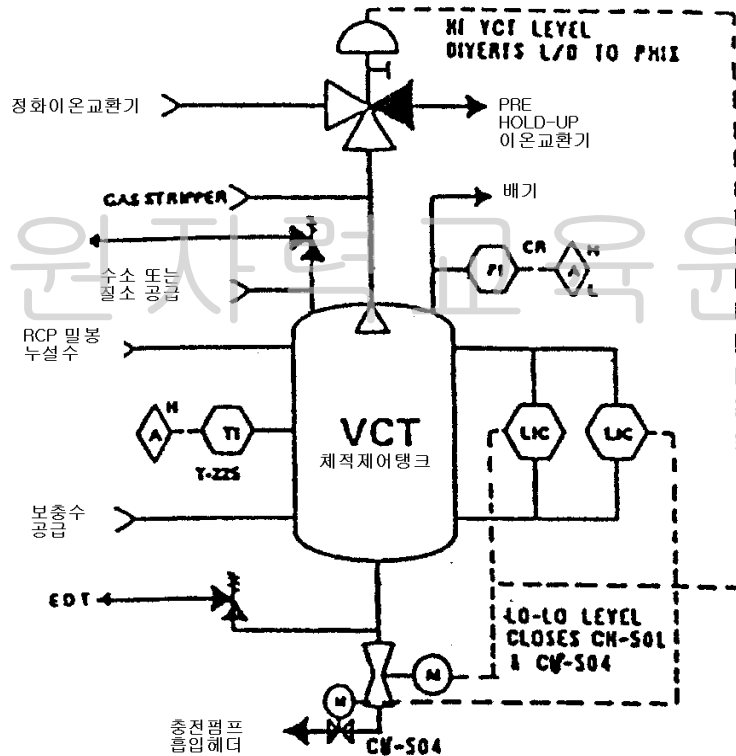
정화 이온교환 수지탑



[그림 3-7] 이온교환기

(7) 체적제어탱크(Volume Control Tank)

체적제어탱크는 수직 원통형의 탱크로서 저장용량은 약 18.6m³ 정도이다. 이 탱크에서는 새로운 붕소농도를 조절할 수 있는데, 고농도의 붕소를 함유한 재장전수탱크(RWT)와 순수한 물을 함유한 원자로 보충수탱크(RMWT)로부터의 오는 보충수 연결관이 있다. 이러한 붕산수와 순수는 붕산수보충펌프(BAMP)와 원자로 보충수펌프(RMWP)에 의해 각 탱크에서 이송되어 체적제어탱크로 들어가기전 전단의 혼합배관에서 혼합된다. 체적제어탱크에 유입되는 물은 72gpm의 유출수와 16gpm의 냉각재누설(Bleed off) 관으로부터의 밀봉누설수이다. 체적제어탱크에는 원자로냉각재 내의 용존산소를 제어하기 위하여 수소 및 질소공급관이 설치되어 있는데 이 배관은 탱크 상부측에 연결되어 있다. 그리고 불활성기체를 제거하는 배관도 탱크 상부에 연결되어 있어 냉각재내 포함된 불활성 기체를 폐기물처리계통으로 배기시킬 수 있다.



[그림 3-8] 체적제어탱크

나. 충전 계통(Charging System)

충전계통은 체적제어탱크에서 원자로냉각재 입구관까지의 유로를 말하며 주요기기로는 충전펌프 및 충전수 차단밸브와 RCP 밀봉수 유량조절 및 차단밸브 등이 설치되어 있다.

(1) 충전펌프(Charging Pump)

충전펌프는 체적제어탱크에 저장된 유출수를 원자로냉각재로 돌려보내고 일부는 RCP 밀봉수로 공급한다. 4대중 3대의 충전펌프는 정상운전시 수질정화된 충전수를 공급할 수 있다. 보통 2대가 운전되어 원자로냉각재 유출 정화유량과 원자로냉각재펌프의 조절된 밀봉누설 유량을 감당한다. 한대는 가압기수위가 적정 유지해야할 수위이하로 감소시에 자동으로 기동되며 가압기수위가 적정 유지해야할 수위 이상으로 증가하면 자동 정지된다. 나머지 한대는 전원은 투입된 상태에서 key-off 상태로 유지한다. 각 펌프는 왕복동형으로 44gpm의 용량을 가진다.

(2) 충전관 격리밸브(CV-524, 240)

충전관격리밸브는 원자로냉각재 계통으로 주입되는 충전수를 차단하는 기능을 한다. 이 밸브는 보조건물에서 격납건물로 들어가기 전에 충전관 격리밸브(CV-524)를 통과하며 정상운전시 개방되어 있다. 재생열교환기를 지난 충전유량은 두 유로중의 하나를 통과하게 되며 하나는 정상충전 유로로서 이는 CV-240 밸브를 지나 냉각재계통으로 유입되고 다른 하나의 유로는 보조살수밸브로 간다. 냉각재 배관과의 연결부는 열소매(Thermal sleeve)가 부착되어 차거운 충전수와 고온의 원자로냉각재관과의 열응력을 제한한다.

(3) 가압기 보조살수 격리밸브(CV-203, 205)

원자로냉각재계통의 압력은 냉각재계통에 연결된 가압기내의 물과 증기 온도를 변화시켜서 압력을 조절한다. 가압기내에는 물과 증기가 공존하고 있는데 하부에서는 전기가열기로 물의 온도를 높여서 압력을 상승시키고, 상부에서는 가압기내 온도보다 상대적으로 낮은 살수유량을 뿌려서 증기와 물의 온도를 감소시켜 압력을 낮춘다. 그러나 이러한 운전은 RCP가 운전 되어야만 가능한데 정상 살수유량은 RCP 출구측에서 공급하기 때문이다. 다만 RCP가 운전이 되지 않을 경우 화학 및 체적제어계통에서

충전유량중 일부를 가압기에 공급하는 연결관이 있다. 이를 가압기 보조살수관 이라고 하고 이를 격리하는 밸브를 보조살수 격리밸브라 한다.

다. 원자로냉각재펌프 밀봉수 계통(RCP Sealwater System)

원자로냉각재펌프는 축을 통해 고온·고압의 냉각재가 외부로 누출되는 것을 방지하기 위한 축밀봉 뭉치를 가지고 있다. 축 밀봉을 하기 위해서는 원자로냉각재 압력 보다 높은 밀봉수가 공급되어야 하며 이러한 밀봉수(펌프당 6.6gpm)는 충전펌프 출구관에서부터 공급받는다. 그리고 원자로냉각재 펌프의 밀봉수는 밀봉뭉치에서 2부분으로 나누어져 일부는 원자로냉각재로 들어가고 나머지 누설수는 다시 체적제어탱크로 회수되는데 이때 회수되기전 열교환기를 거쳐서 체적제어탱크로 회수된다.

(1) 밀봉주입 열교환기

밀봉주입 열교환기는 수직형으로 설치되어 보조증기를 이용, 밀봉주입수를 가열하여 원자로냉각재펌프로 공급하는 밀봉주입수 온도를 48.8℃로 일정 유지한다. 이 열교환기는 4.4℃로부터 48.8℃까지 온도를 증가시킬 용량을 갖고 있으며 열교환기 후단에 설치된 온도계측기는 밀봉주입수 온도를 측정하여 고-고 온도 (65.5℃), 고-온도 (62.7℃), 저-온도(23.8℃), 저-저 온도(21.1℃) 시에는 경보를 발생시키는 기능과 고-고 온도'나 '저-저 온도'시 CV-231P 밸브를 차단하는 기능을 한다.

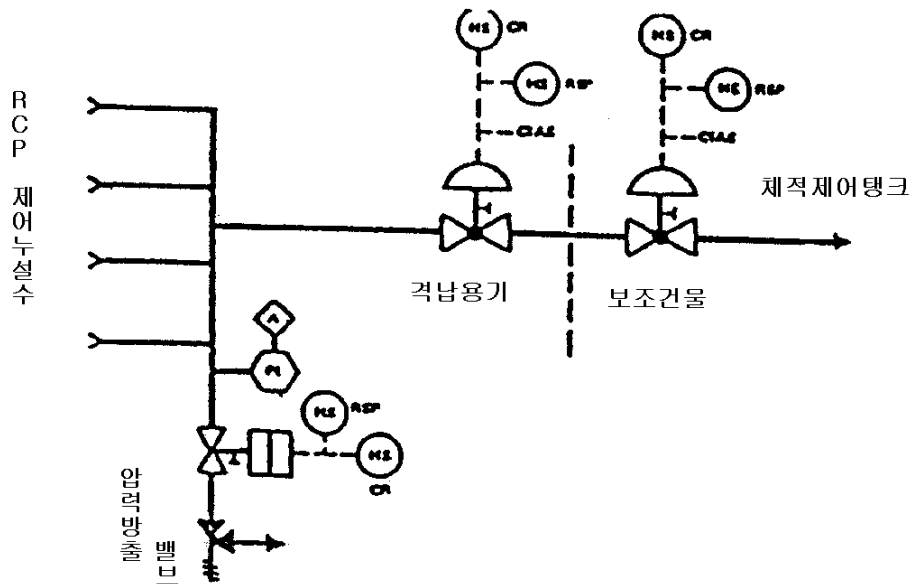
(2) 밀봉주입 여과기

밀봉주입 열교환기를 지난 밀봉수는 두 병렬 밀봉주입 여과기중의 하나를 거치게 된다. 각 여과기는 밀봉수내에 포함된 불용성 입자를 제거하는데 최대공급 유량인 30gpm까지 처리 가능하다. 여과기를 거친 후에는 밀봉주입수 격납용기 격리밸브를 통과하고 이후 격납용기로 들어가서 각 원자로냉각재펌프의 밀봉체로 들어간다. 여기에는 유량측정기(FE-241, 242, 243, 244)들이 설치되어 있어 밀봉주입수 유량이 6.6gpm 정도로 유지하도록 밀봉수 유량제어 밸브를 제어한다.

(3) 원자로냉각재펌프 밀봉누설(Bleed off)

각 냉각재펌프는 공통관으로 총 4gal의 제어된 밀봉누설수를 방출한다. 이 공통관은 압력계기에 의해 감시 및 지시되고 고 압력 및 고-고 압력경보를 발생한다. 공통관에는 압력방출 격리밸브인 CV-507과 압력방출 밸브인 CV-199가 설치되어 225psig

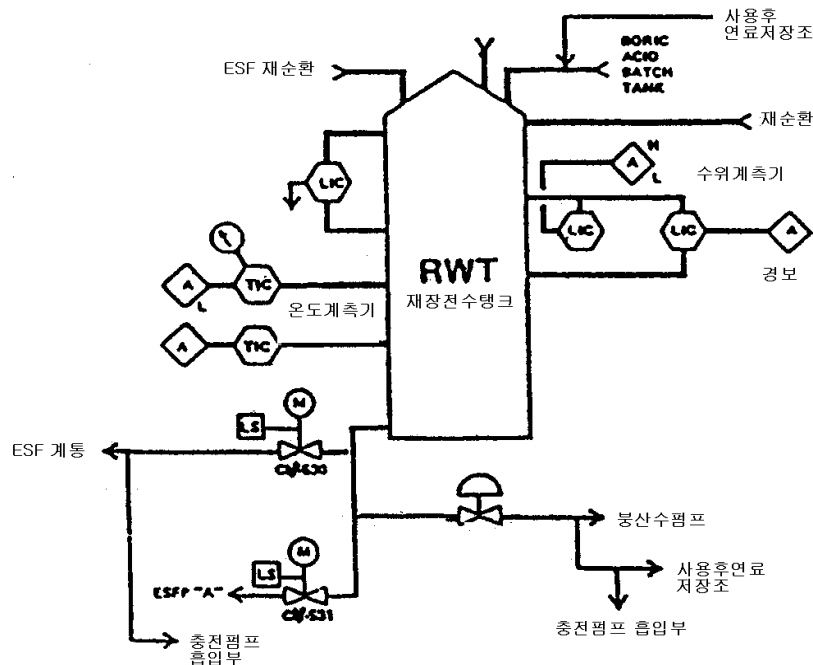
에서 원자로배수탱크로 배수되며 정상적인 유로는 CV-506, 505 밸브를 통하여 체적제어탱크로 방출된다.



[그림 3-9] 냉각재펌프 밀봉누설

라. 재장전수탱크(RWP)

화학 및 체적제어계통에서 정상 봉산수 공급원은 재장전수탱크(RWT)이며 봉산수의 농도는 4,000~4,400ppm이다. 재장전수탱크는 노심말기(90%)에 5% 미임계로의 저온정지와 재기동을 허용하고 핵연료 재장전시 재장전수조를 충수한다. 또한 발전소 사고발생시 비상안전주입계통에 비상냉각수를 공급할 수 있도록 탱크내 적정 봉산수 저장용량을 갖고 있다. 탱크에는 주제어실과 현장에서 볼수 있는 온도지시계와 주제어실에서만 볼 수 있는 수위지시계가 있다. 탱크수위 계측설비가 있어 발전소보호계통으로 신호를 전송하는데 이들 수위계측기 중 2개가 7.6% 수위 이하일 경우 재순환 동작 신호를 발생시킨다.



[그림 3-10] 재장전수탱크

3. 계통 설명

가. 정상운전

(1) 정상유출

냉각재계통에서 요구하는 냉각재량은 가압기 수위제어계통과 화학 및 체적제어 계통에 의해 유지된다. 가압기수위 제어계통은 유출유량 제어밸브인 CV-110P, 110Q와 충전펌프를 운전하여 제어한다. 유출수는 원자로냉각재계통으로부터 오는 고온의 유출수의 냉각을 위해 재생열교환기의 관측을 통과한다. 그리고 압력강하용 오리피스를 통과하면서 감압되고 배압제어밸브로 유출열교환기 운전압력인 32.3kg/cm²까지 감압

시킨다. 이후 배압제어밸브 후단에서부터 정화 유로관에는 계통 운전압력인 4.2kg/cm^2 와 48.8°C 온도까지 감소된후 정화 여과기, 이온교환기, 스트레이너를 통해 체적제어탱크로 살수된다. 유출유량중 일부는 공정방사능 감시기와 붕산농도 측정기를 통과한다.

(2) 정상충전

충전펌프는 체적제어탱크로부터 흡입하여 냉각재계통과 냉각재펌프 밀봉부로 공급되며 보통 2대가 운전된다. 충전유량중 62gpm은 유출유량으로부터 열회수를 위하여 재생열교환기 동체측을 통해 흐르고 나머지 26gpm은 펌프 밀봉주입으로 전환된다. 밀봉주입수는 보조증기에 의해 가열되는 열교환기에 의해서 125°F 로 일정하게 유지되며 여과후 각 펌프로 공급된다.

(3) 보충계통

냉각재의 붕산농도는 보충계통에 의해 조절되고 보충제어기를 통해 혼합 하며 체적제어탱크나 우회밸브인 CV-527을 통해 직접 충전펌프 흡입 헤더로 펌프에 의해 이송된다. 보충제어기는 붕산 유량 총량기 F-210Y, 원자로보충수 총량기 F-210X, 붕산수보충펌프 선택스위치, 원자로보충수펌프 선택스위치, 보충모드 선택 스위치 등으로 구성되고 보충모드는 “자동, 붕산주입, 희석, 수동” 정지 5가지 모드가 있다. 한 번에 각각 1대의 붕산수보충펌프와 원자로보충펌프가 운전되고 CV-512와 CV-527은 동시개방이 안되며 재장전수탱크나 원자로보충수탱크의 저-저 수위에 의해 운전중인 펌프가 자동 정지되도록 설계되어 있다.

(가) 자동모드

L-226으로부터 보충신호(34% 체적제어탱크 수위)에 따라 선택된 붕산수보충 펌프 및 원자로보충수펌프가 기동되고 CV-210X는 F-210X의 설정에 의해 개방되며 개방되었던 CV-511은 자동으로 닫힌다. CV-210Y 밸브는 F-210Y 설정에 의해 개방되고 개방되었던 CV-510은 자동으로 닫기며 체적제어탱크 혼합 보충수 유량 통과를 위해 CV-512 밸브가 열린다. 보충중지신호(44%)에 따라 펌프는 정지되고 CV-210X, 210Y, 512 밸브는 자동적으로 닫기고 CV-510과 CV-511 밸브의 제어스위치가 개방 위치라면 자동으로 열린다.

(나) 봉산 주입모드

교반스위치 F-210X를 수동으로 주입할 보충수량에 맞추고 유량제어기 F-210Y를 수동으로 적당한 유량에 맞춘다. 봉산 주입모드 선택 후에는 봉산수보충펌프가 자동 기동되고 F-210Y 설정에 따라 CV-210Y가 자동으로 열리고 CV-510 밸브는 닫힌다. CV-512 나 527 밸브가 수동으로 열리면 봉산주입이 개시되고 제어스위치가 개방위치에 있을 경우에는 CV-210Y가 자동으로 닫기며 CV-510은 자동으로 열린다. 자동위치로 전환시에는 L-266으로부터 자동보충신호가 없을 경우에 봉산수 보충펌프는 자동 정지된다. CV-512 밸브가 사용되었다면 제어스위치 자동전환시 닫기며 CV-527이 사용되었다면 밸브를 닫기위해 제어스위치를 ‘닫힘’ 위치로 한다.

(다) 희석모드

희석모드 선택 후에 선택된 원자로보충수펌프가 자동 기동되고 F-210X의 설정에 따라 CV-210X의 열림과, 열렸던 CV-511 밸브가 닫기며 CV-512나 527 밸브가 수동으로 선택된다. 희석운전 종료 후에는 제어스위치가 열림 위치시 CV-511이 자동으로 열리고, CV-210X는 자동으로 닫힌다. “자동”으로 모드 전환시 원자로보충수펌프가 자동 정지되고 제어스위치를 “자동”으로 하여 사용된 CV-512가 격리되도록 하며 CV-527이 사용되었다면 제어스위치를 ‘닫힘’ 위치로 하여 밸브를 닫는다.

(라) 수동모드

수동모드 선택시 봉산수보충펌프와 원자로보충수펌프는 수동으로 기동되고 F-210X 및 F-210Y의 설정대로 CV-210X, CV-210Y가 각각 열리고 CV-510 및 511은 자동으로 닫힌다. CV-512나 527은 수동으로 열리고 주입 완료시에는 펌프들을 자동위치로 선택하고 보충모드 선택위치를 자동위치로 함으로써 펌프를 정지하고 CV-210X와 CV-210Y를 닫는다. CV-512가 사용되었다면 “자동”으로 제어스위치를 전환하여 닫고 CV-527이 사용되었다면 제어스위치를 ‘닫힘’ 위치로 하여 밸브를 닫는다.

나. 과도운전

(1) 기동

발전소 기동운전은 저온정지상태로부터 고온대기 상태로 가는 운전을 말한다. 기동 초기에는 화학 및 체적제어계통이 격리되어 충전 및 유출계통이 정지되어 있고

원자로냉각재 정화부분만 정지냉각계통에 의해 운전되고, 또한 원자로냉각재 계통은 물로 채워져 있고 냉각재내 기체는 배기시킨다. 이후 가압기내 물은 전열기로 가열되어 증기형성이 시작되고 원자로냉각재계통은 원자로 냉각재 펌프에 의해 가열되기 시작하여 가압기내 증기가 형성되기 시작하면 증기체적팽창과 함께 유출유량은 점점 더 늘어나고, 원자로냉각재계통은 온도증가에 따라 체적이 증가되어 유출유량은 계속 증가된다. 결국, 가압기수위는 운전요구 수위로 감소되고 원자로냉각재계통은 고온 대기 상태에 도달되어 이후부터는 각 제어계통들은 자동으로 운전되고 정상적인 화학 및 체적제어계통 운전이 지속된다.

(2) 정지

이 운전은 정상압력 및 영출력 온도의 고온대기상태로부터 정비나 핵연료 재장전을 위해 저온정지상태까지 진행하는데 필요한 운전이다. 체적제어탱크는 원자로냉각재계통 속에 있는 핵분열성기체를 방출하기 위하여 체적제어탱크 상부 배기관으로 배기시킨다. 원자로냉각재계통은 저온정지시 요구되는 붕소농도로 고농도의 붕산수를 주입하고 저온정지로 가면서 원자로냉각재 수축에 따른 물량을 계속하여 보충한다. 원자로냉각재계통은 수질정화와 화학처리 운전이 수행되고 결국, 원자로냉각재 계통은 상온까지 감소되고 압력은 대기압으로 떨어지며 가압기는 전체 물로 채워지는 만수위상태로 간다.

[핵심요약]

1. 화학 및 체적제어계통(CVCS)의 기능을 기억합니다.

- ① 원자로냉각재계통(RCS) 재고량 유지
- ② RCS 화학 및 순도유지
- ③ 붕산농도 제어를 통한 원자로 출력제어
- ④ CS 압력제어 보조(Aux Spray)
- ⑤ RCP 밀봉수 공급
- ⑥ RCS 누설시험
- ⑦ RCS 불활성기체 제거

유출계통의 중요한 구성기기는

- ①재생열교환기 ②유출열교환기 ③유출유량제어밸브 ④유출관배압밸브 ⑤유출수정화여과기 ⑥이온교환기 ⑦체적제어탱크

충전계통의 중요한 구성기기는

- ①충전펌프 ②충전관격리밸브 ③가압기보조살수결리밸브

원자로냉각재 밀봉수계통의 중요 구성기기는

- ①밀봉주입열교환기 ②밀봉주입여과기 ③원자로냉각재펌프 밀봉누설

기타 재장전수탱크가 있다. 이들 구성기기들이 계통에서 어떤 기능들을 담당하고 있는지 기억하도록 합니다.

제2절 1차기기 냉각수계통

[학습목표]

1. 기기냉각수계통의 기능을 설명할 수 있다.
2. 기기냉각수계통의 설계기준을 설명할 수 있다.
3. 기기냉각수계통의 주요 구성기기를 설명할 수 있다.
4. 기기냉각수계통의 운전에 대하여 설명할 수 있다.

1. 개 요

기기냉각수계통은 발전소 정상운전 시는 특정 보조기기에, 냉각재상실사고 시에는 공학적 안전설비에 냉각수를 공급한다. 이 계통은 방사능 오염 가능성이 있는 계통으로부터 통제되지 않은 방사능 누출을 방지하기 위하여, 이들 계통과 기기냉각해수계통 사이에서 중간 방호벽 역할을 하는 폐쇄순환계통이다. 또한, 이 계통은 정상운전 시 일부 비 안전성관련 기기에 냉각수를 공급한다.

2. 설계기준

- 가. 바람 및 태풍으로부터 기기냉각수계통에 대한 방호는 최종 안전성 분석보고서(FSAR : Final Safety Analysis Report) 3.3절에, 범람설계는 FSAR 3.4절에, 비산물 방호는 FSAR 3.5절에, 가상 배관 파단사고와 관련된 동적 효과에 대한 방호는 FSAR 3.6절에, 환경설계는 FSAR 3.11절에 각각 기술되어 있다.
- 나. 기기냉각수계통은 냉각재상실사고 시 연료 또는 노심 손상을 방지하기 위하여 원자로내의 붕괴 열에너지와 격납용기 증기 에너지를 각각 정지냉각 열교환기와 격납용기 살수 열교환기에 의해 기기냉각해수계통으로 전달할 수 있도록 설계되어야 한다.
- 다. 소외전원 상실과 동시에 기기의 단일고장을 가정하여 본 계통의 안전 정지

기능이 손상되지 않도록 해야한다. 기기냉각수계통 중 냉각재상실사고 시 작동이 요구되는 부분은 안전정지기간 동안 및 그 이후에도 기능을 유지하도록 설계되어야 한다.

- 라. 발전소 정상운전 중에 능동기기에 대한 정기적인 검사 및 시험이 가능하도록 설계되어야 한다. 적절한 시기에 중요 기기의 검사를 위한 설비가 갖추어져야 한다. 가동 중 시험의 목적은 계통이 설계된 대로 작동되고 발전소 최대 출력 시의 열부하에서도 적절한 온도와 유량의 냉각수를 공급함을 확인하며, 기기냉각수펌프가 계통의 운전모드에 따른 다양한 유량에서도 원활히 운전됨을 확인하기 위함이다.
- 마. 기기냉각수계통은 정지냉각계통 및 기기냉각해수계통과 함께 원자로 정상정지 이후, 증기발생기가 고유 기능을 하지 못하는 시점부터 상온정지 시까지 원자로냉각재계통을 냉각할 수 있도록 설계되어야 한다.
- 바. 기기냉각수계통은 기기냉각해수를 열 제거원으로 사용하여 정상운전 및 가동 시 최대 95°F(35℃)의 냉각수를, 정상 초기 운전정지 기간 및 초기사고 기간 동안 최대 110°F(43.3℃)의 냉각수를 공급하도록 설계되어야 한다.
- 사. 기기냉각수계통은 출력운전 동안 방사능 누출이 발생할 가능성이 있는 보조계통에 신뢰성 있는 냉각수를 공급하도록 해야 한다.
- 아. 기기냉각수계통은 방사능 누출 시 이를 감지하고 방사능 누출부위가 격리될 수 있도록 설계되어야 한다.
- 자. 기기냉각수계통은 저 열부하 및 기기냉각해수의 온도가 극히 낮은 조건하에서도 기기냉각수 온도를 항상 60°F(15.6℃) 이상을 유지하도록 하여야 한다.

3. 계통설명

가. 개 요

기기냉각수계통은 2개의 독립적이면서 다중의 계열로 구성되며, 냉각재상실사고

시에는 일부 안전성관련 기기를 포함하여 공학적 안전설비에, 그리고 정상운전 시에는 특정 비 안전성 및 안전성관련 기기에 냉각수를 공급한다.

본 계통의 주요기기는 기기냉각수 열교환기 4대, 기기냉각수펌프 4대, 기기냉각수 보충펌프 2대, 완충탱크 2대, 화학약품 주입탱크 2대, 그리고 관련 배관, 밸브 및 제측제어 기기 등으로 구성된다.

기기냉각수계통의 각 계열은 다음 기기로부터 발생하는 열 부하를 제거하기 위하여 냉각수를 공급한다.

(1) 안전성관련 열 부하

- (가) 격납용기 살수 열교환기
- (나) 정지냉각 열교환기
- (다) 비상디젤발전기 열교환기
- (라) 필수 냉방기
- (마) 사용후연료저장조 냉각 열교환기

(2) 비 안전성관련 열 부하

- (가) 액체폐기물계통 증발기 패키지
- (나) 봉산 농축기 패키지
- (다) 탈기기 패키지
- (라) 유출수 열교환기
- (마) 증기발생기 취출 비재생 열교환기
- (바) 방사성폐기물건물 냉방기
- (사) 원자로냉각재펌프 오일 냉각기, 고압 냉각기, 밀봉수 냉각기 및 전동기 오일 냉각기, 공기 냉각기
- (아) 1차시료채취계통 시료 냉각기
- (자) 복수회수탱크 배기 응축기
- (차) 격납용기 냉방기
- (카) 방사선 감시기

위 기기의 (다), (라), (사), 항의 ASME B & PV Code Section III, 압력경계와 접하는 부위는 안전등급으로 분류되고 있다. 그러나 이들 기기에 대한 냉각수 공급설비는 비 안전 관련이므로 비 다중, 비 내진이다. 즉, 내진범주 I로 설계되어 있지 않다.

기기냉각수 열교환기 우회관에는 저열부하 또는 기기냉각해수의 온도가 낮은 조건하에서도 운전원이 기기냉각수 온도를 60°F(15.6°C) 이상으로 유지할 수 있도록 수동 차단밸브 및 유량 조절밸브가 설치되어 있다.

나. 주요 구성기기

기기냉각수계통의 각 기기에 대한 설계 제원은 <표 3-1>과 같다.

(1) 기기냉각수펌프

4대의 기기냉각수펌프 각각은 사고 시 필요 유량의 100% 용량을 공급한다. 펌프는 수평 원심형으로서 펌프 흡입구는 완충탱크에 의해 항상 물이 충전되도록 설계되어 있다. 각 계열에는 용량 100%인 2대의 펌프가 병렬로 설치되어 각각 안전 및 비 안전관련 기기냉각수계열과 연결되어 있다. 이들 펌프는 동일한 전기 모선에 의해 전원을 공급받는다. 비 안전성관련 부하는 안전주입작동신호(SIAS : Safety Injection Actuation Signal)나 완충탱크 저-저 수위 신호에 의해 자동 격리된다. 원자로냉각재 펌프는 격납용기 살수 작동신호(CSAS : Containment Spray Actuation Signal)나 완충탱크 저-저 수위 신호에 의해 격리된다. 발전소 정상운전 시 각 계열에서 1대의 펌프가 작동되고, 이러한 가동 중인 펌프는 각 계열에서 1대의 펌프가 사고 시 운전을 보장하도록 안전주입 작동신호(SIAS)를 받는다. 각 계열에서 작동되고 있던 펌프가 고장이 발생하면 대기펌프가 자동적으로 기동하게 된다. 기기냉각수펌프의 장기 정비, 또는 수리 시 운영기술지침서에서 요구하는 발전소 운전정지를 피하기 위해 한 계열당 용량 100%인 펌프가 2대 있다.

(2) 기기냉각수 열교환기

기기냉각수 열교환기는 수평 동체-직관 튜브형이다. 튜브측은 기기냉각해수계통으로부터 해수가 공급되고 동체측은 기기냉각수펌프의 토출구로부터 기기냉각수가 공급된다. 열교환기의 열전달 표면적은 모든 운전모드에서 요구하는 것보다 초과 설계

하여 충분한 열 제거 능력을 갖도록 되어 있다.

(3) 기기냉각수 완충탱크

열 천이현상이나 누출로 인한 계통의 체적 변화를 수용하기 위해 각 안전성 관련 기기냉각수 계열 당 1대의 기기냉각수 완충탱크가 있다. 각 기기냉각수 완충탱크에 대한 보충수는 보충탈염수계통으로부터 공급되며, 이 계통이 이용 불가능일 경우 보충수 예비공급원으로서 안전등급인 복수저장 및 이송계통으로부터 보충수가 공급된다.

완충탱크의 보충수 공급은 탱크 저 수위 신호에 의해 시작되며, 만일 완충탱크 수위가 계속해서 감소되면, 저-저 수위 신호에 의해 기기냉각수계통으로부터 비 안전성관련 부하는 자동적으로 격리된다.

기기냉각수 완충탱크는 기기냉각수계통의 비 안전 등급부분에서 최악의 가상 배관파단사고로 인한 계통수 손실(완충탱크의 저 수위 신호로 비 내진 공급 및 회수 격리밸브가 자동차단 된다고 가정)과 보충수 없이 7일간 기기냉각수의 정상 누수를 보상하도록 충분한 용량을 갖도록 설계되었다.

(4) 화학약품 주입탱크

부식 억제를 위해 계통의 화학 조성을 조절할 수 있도록 아질산나트륨(NaNO_2)과 사붕산나트륨($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)의 첨가를 위하여 각 계열에 1대의 화학약품 주입탱크가 있다. 주입된 화학물질이 잘 혼합되도록 탱크는 기기냉각수펌프의 흡입구에 연결되어 있다.

(5) 원자로 보조기기 열교환기

일반적으로, 기기냉각수는 동체측으로, 잠재적 방사성유체는 튜브측으로 흐른다. 기기냉각수계통의 열부하가 되는 원자로 보조기기와 그들의 유량 조건이 FSAR [표 9.2-5]와 [표 9.2-6]에 열거되어 있다.

(6) 기기냉각수 보충펌프

기기냉각수계통은 각 계열 당 1대의 수평 원심형 기기냉각수 보충펌프가 복수 저장탱크로부터 흡입을 하여 기기냉각수 완충탱크에 보충수를 공급한다. 이 펌프는 기기냉각수 완충탱크의 저 수위에서 기동되고 고-수위에서 자동 정지된다.

다. 계통운전

(1) 개 요

기기냉각수계통은 기기냉각수펌프에 의해 냉각수가 계통 내를 계속적으로 재순환하는 폐쇄 순환계통이다. 각종 보조기기에서 발생된 열은 기기냉각수 열교환기의 튜브측으로 흐르는 기기냉각해수에 의해 제거된다. 계통의 정상 보충수는 보충탈염수계통에서 공급되며, 비상시는 복수저장탱크로부터 기기냉각수 보충펌프에 의해 공급된다.

기기냉각수계통 내 물의 수소이온 농도(pH) 및 부식방지제 농도는 주기적으로 분석되며, 기기냉각수의 화학성분 조건은 [표 3-2]에 열거되어 있다. 비정상적인 화학성분은 그 근원을 제거하고 계통으로부터 필요한 만큼의 물을 배수시킨 후 완충탱크에 보충수를 공급하여 화학성분을 조절한다.

기기냉각수계통의 배수는 액체방사성폐기물계통에 의해 처리된다.

계통내의 방사성물질 누출을 측정하기 위해 방사능 감시기가 설치되어 있다. 방사능 증가와 기 설정된 완충탱크 수위의 지속적인 증가는 방사성물질의 누출 가능성을 나타낸다. 방사성 물질이 누출에 의해 경보가 발생하면 운전원은 누설이 예상되는 기기를 선택적으로 격리하고 이 기기가 격리되어 있는 동안 기기냉각수의 방사능 증가율을 관찰함으로써 누설되는 기기를 확인할 수 있다. 일단 누출지점이 확인되면, 그 기기는 정비가 완료될 때까지 격리 상태로 유지한다.

운전원은 수동 차단밸브를 개방하여 기기냉각수의 일부를 기기냉각수 열교환기 주위로 우회시킬 수 있다. 이 우회유량은 낮은 열부하나 매우 낮은 기기냉각해수 온도 상태에서 기기냉각수 온도를 60°F(15.6°C) 이상으로 유지시키기 위해 사용된다.

(2) 출력운전

정상 운전 중 기기냉각수계통은 각 계열 당 1대의 펌프와 1대의 열교환기가 운전되어 각 계열의 안전성관련 및 비 안전성관련 부분에 냉각수를 공급한다. 운전 중이던 펌프가 정지하면 동 계열의 대기펌프가 자동 기동한다. 정상 운전 시, 발전소 기기에 공급되는 기기냉각수의 온도는 열교환기 출구온도를 기준으로 하여 65°F(18.3°C)에서 95°F(35°C)이고, 최대 온도[95°F(35°C)]는 기기냉각수 열교환기의 튜브측에 공급되는 기기냉각해수 온도[78°F(25.6°C)]를 근거로 계산된 값이다. 사용후연료저장조 냉각

열교환기의 냉각수 흐름은 사용후 연료가 저장조 내에 저장되어 있는 기간 동안만 필요하다.

계통 누설과 시료채취로 인한 계통수 손실을 보충해 주기 위해 완충탱크에 대한 주기적인 계통수 보충이 필요하다. 장기적인 부식을 억제하기 위해 필요에 따라 화학약품주입탱크를 이용하여 부식 방지제가 첨가된다.

(3) 발전소 냉각 및 정지

발전소 정지 3.5시간후 기기냉각수계통이 다음 24시간 동안 원자로냉각재계통을 125°F(51.7°C)까지 냉각시키도록 설계되어 있다. 이러한 24시간 동안 계열 당 2대의 펌프 및 계열당 2대의 기기냉각수 열교환기로 두 계열 모두 운전된다. 한 계열의 정지냉각계통만이 작동되는 경우에는 관련되는 기기냉각수계통 한 계열이 좀 더 장시간 운전됨으로써 발전소는 안전하게 상온정지 상태에 도달할 수 있다. 냉각단계에서 기기냉각수 온도는 냉각 초기에 110°F(43.3°C), 냉각 말기에 95°F(35°C)를 넘지 않는다.

(4) 비정상 운전

- (가) 비정상 운전 기간 중 각 계열 당 1대의 펌프와 1대의 열교환기가 운전되어 안전 정지 및 비정상 상태 완화에 필요한 안전성 관련 기기에 냉각수를 공급한다.
- (나) 안전주입작동신호가 발생하면 비상디젤 발전기에 냉각수가 공급되며, 원자로냉각재펌프 냉각기를 제외한 모든 비 안전성관련 열부하 기기에 흐르던 냉각수가 자동차단 되고, 격납용기 살수 열교환기 A 계열의 격리밸브가 유량 평형을 맞추기 위해 30% 자동 개방되고, 계열 B의 격리밸브는 완전히 개방된다. 격납용기 살수 작동신호가 발생하면 원자로냉각재펌프에 공급되던 기기냉각수의 공급이 차단된다. 필수 냉동기 및 사용후연료저장조 냉각 열교환기에는 공학적안전설비 작동신호에 관계없이 냉각수가 공급된다. 사고 후 일차 시료채취계통 시료냉각기에는 사고동안 공학적안전설비 작동신호를 무시함으로써 냉각수 공급밸브를 개방하여 냉각수를 공급할 수 있다.
- (다) 안전주입 작동신호(SIAS)가 발생하면 정지냉각 열교환기에 공급되는 냉각수가 자동 격리되고, 격납용기 살수 작동신호(CSAS) 또는 재순환신호

(RAS)가 발생하면 격납용기 살수 열교환기에 자동적으로 냉각수가 공급된다. 원자로의 장기간 붕괴열 제거를 위하여 직접 냉각 시 정지냉각 열교환기에 수동으로 냉각수를 공급할 수 있다. 이 경우 격납용기 살수 열교환기의 냉각수는 운전원에 의해 수동으로 차단된다.

(라) 소외전원 상실(LOOP : Loss of Off-site Power) 시에는 기기냉각수계통의 각 계열은 비상디젤 발전기의 부하 투입순서에 따라 자동으로 전원을 공급받는다.

4. 안전성 평가

기기냉각수계통은 사고 시 계통 배열상태 즉, 계열 당 1대의 펌프가 작동되고 계통의 비 안전성 관련 부분은 격리된 상태에서 필요한 최소 유량이 확보되도록 설계되어 있다.

이 계통은 공학적안전설비 작동신호(ESFAS)가 발생하면 사고 시 계통 배열상태로 자동 전환된다. 격납용기 살수 열교환기에 대한 냉각수 공급은 안전주입 작동신호, 격납용기 살수 작동신호 또는 운전원에 의하여 개시된다. 기기냉각수계통의 열은 기기냉각해수계통으로 방출된다.

기기냉각수계통은 용량과 배열이 서로 유사한 2개의 다중 계열로 구성되며, 역시 다중의 기기냉각해수계통과 연계하여, 어떠한 단일기기의 고장 시라도 사고완화에 필요한 열제거 능력이 충분하도록 보장한다.

각 계열은 사고 시 열제거 능력을 충분히 보유하고 있기 때문에, 기기냉각수계통의 안전성관련 부분으로부터 비 안전성 관련 부분을 격리하는 단일 격리밸브의 고장으로 사고완화 기능이 저해되지 않는다. 100% 다중성을 가진 격납용기 살수 열교환기 2대가 설치되어 있으므로, 격납용기 살수 열교환기에 연결된 하나의 정상 단함밸브가 자동 혹은 수동 신호로 개방되지 않더라도 냉각재상실사고 이후 적절한 냉각은 저해받지 않는다.

소외전원 상실 시, 필요한 모든 1E급 기기들은 비상 디젤발전기로부터 전원을 공급받도록 되어있다.

계통 배관의 비 안전성 관련 부분에서 최악의 배관 파단이 일어나면, 완충탱크 저-저 수위 신호에 의해 기기냉각수계통의 비 안전성 관련 부분이 자동 격리된다. 완충탱크 수위가 최저 수위에 도달하기 전에 격리가 완료되므로, 비 안전성 관련 배관의 파단으로 본 계통의 안전성 관련 부분은 영향을 받지 않는다.

격납용기 내부의 원자로냉각재펌프에 냉각수를 공급하는 가상 배관의 파단에 의하여 기기냉각수의 손실이 발생하면, 관련계열의 완충탱크 수위가 감소하여 저-저 수위 신호가 발생하고, 격납용기 내 원자로냉각재펌프에 공급되는 기기냉각수 배관의 전동 기구동 격리밸브가 자동 폐쇄된다.

기기냉각수 열교환기 우회밸브는 수동형이고, 정상 시 닫힘 고정되어 있다. 우회밸브의 작동은 기기냉각수 온도를 최소 60°F(15.6°C)이상으로 유지하기 위하여 운전 절차에 따라 제어된다.

기기냉각수계통 중 냉각재상실사고 이후 기능 수행에 필요한 부분은 내진범주 I 요건에 따라 설계된다. 내진범주 I 은 아니나 이의 고장에 의한 충격으로 인해 기기냉각수계통의 필요한 기능에 손실을 초래하는 계통, 장치, 혹은 기기는 그것에 지진 하중이 걸리더라도 붕괴되지 않도록 지지되어 있다.

기기냉각수계통은 정상전원과 비상전원의 절환을 포함하여, 계통을 원자로 정지 및 냉각재상실사고 운전이 필요한 운전모드로 변환시키는 전운전 과정에 대한 시험을 할 수 있도록 설계되어 있다.

기기냉각수계통의 중요한 기기들 즉 펌프, 밸브, 열교환기 및 관련 배관 등은 주기적인 가동 중 검사를 받을 수 있도록 설계되어 있다.

기기냉각수계통은 정지냉각계통 및 기기냉각해수계통과 함께 노심 및 원자로냉각재계통을 상온정지 조건까지 냉각시키고 상온정지 조건을 유지시킬 수 있도록 설계되어 있다.

5. 계측설비

기기냉각수계통에는 다음과 같은 계측설비가 있다.

가. 기기냉각수펌프 출구 및 열교환기 출구 모관의 유량 지시계

- 나. 기기냉각수 열교환기 입구 및 출구 온도 지시계
- 다. 기기냉각수펌프 출구와 기기냉각수 열교환기 사이의 압력 지시계
- 라. 원자로냉각재펌프와 전동기 냉각수 유량 지시계
- 마. 기기냉각수 완충탱크 수위 지시계
- 바. 기기냉각수 공급 모관 방사능 감시기
- 사. 기기냉각수 보충펌프와 기기냉각수 완충탱크 사이의 압력 및 유량 지시계
- 아. 기기냉각수를 공급받는 모든 안전등급 기기의 출구배관 중 주제어실로 보내지는 유량 및 온도 지시계

각 기기냉각수펌프 출구관에는 현장 압력지시계가 설치되어 있고, 펌프 출구모관의 압력은 주제어실에 표시된다. 만일 기기냉각수펌프가 운전 중에 고장나면 펌프 출구모관 저압 신호에 의해 대기펌프 1대가 자동 기동한다.

각 기기냉각수펌프 흡입관에는 현장 압력지시계가 설치되어 있다. 이 지시계는 펌프 시험 및 초기 펌프 시운전 시 펌프의 성능시험 및 임시 여과기의 막힘 상태를 감시하는데 사용된다.

각 기기냉각수 완충탱크의 수위는 현장 및 주제어실에 각각 표시된다. 수위가 정상 범위 이상 혹은 이하로 변하게 되면 고 및 저-수위 경보가 발생한다. 완충탱크 수위가 저-수위 설정치 이하로 내려가는지를 감지하기 위해 계기가 다중으로 설치되어 있다.

원자로냉각재펌프에 공급되는 기기냉각수 유량상실 시 운전원에게 경고하기 위해 주제어실에는 다중의 저-유량 경보기가 설치되어 있다.

6. 제어연동

- 가. 부하 순차 투입신호 존재 시 1계열의 운전 중인 펌프가 트립되면 대기펌프가 자동으로 기동된다.
- 나. 운전 중인 펌프의 모관 토출 압력이 낮으면 자동모드에서 대기중인 펌프가 자동으로 기동된다.
- 다. 안전주입 작동신호 발생 시 원자로냉각재펌프를 제외한 모든 비 안전 관련

부하는 자동으로 차단되고, 사고 후 일차 시료채취계통 시료냉각기에는 사고동안 공학적안전설비 동작신호(ESFAS)를 무시함으로써 시료 냉각기 냉각수 공급밸브를 개방하여 냉각수를 공급할 수 있다.

- 라. 격납용기 살수 작동신호 시 원자로냉각재펌프에 냉각수 공급이 차단된다.
- 마. 발전소 모든 운전모드에서 필수 냉방기와 사용후연료저장조 냉각 열교환기로의 냉각수 공급은 계속된다. 안전주입 작동신호 발생 시 자동으로 비상디젤발전기에 냉각수가 공급되고, 격납용기 살수 열교환기 A 계열의 격리밸브가 유량 평형을 맞추기 위해 30% 자동 개방되고 계열 B의 격리밸브는 완전히 개방된다.
- 바. 격납용기 살수 작동신호 발생 시 격납용기 살수 열교환기에 냉각수 공급이 개시된다. 정지냉각 열교환기 차단밸브는 원자로냉각재로부터 열을 제거하기 위하여 수동으로 개방할 수 있으며 이 경우 격납용기 살수 열교환기의 냉각수는 수동으로 격리된다. 재순환신호 발생 시 냉각수가 공급되고 있는 정지냉각 열교환기가 자동으로 격리된다.
- 사. 완충탱크 저 수위 신호 시 완충탱크 보충수밸브가 개방되어 보충탈염수계통으로부터 보충수를 공급받는다. 또한 완충탱크 저 수위 신호 시 복수저장탱크로부터 보충수를 공급받을 수 있도록 기기냉각수 보충펌프가 기동되고 고-수위 시 정지된다.
- 아. 완충탱크 저-저 수위 신호는 관련 계열의 모든 비 안전관련 기기를 차단한다.
- 자. 열교환기 우회밸브는 해수온도가 낮을 시 최소 65°F의 냉각수 온도를 유지하기 위해 수동으로 개방되고 조절될 수 있다.
- 차. 발전소 필수 기기에 냉각수를 수동으로 공급하고, 격리할 수 있도록 제어 스위치가 주제어실 패널에 있다.
- 카. 비상 디젤발전기 기동신호 시 자동으로 디젤발전기 고온, 저온 열교환기에 냉각수 공급이 개시된다.

- 타. 필수 냉방수 펌프, 방사성폐기물건물 냉방수 펌프, 격납용기 냉방수 펌프의 기동신호 존재 시 자동으로 관련 냉방기에 기기냉각수 공급이 개시된다.
- 파. 기기냉각수펌프를 수동으로 기동, 정지하기 위한 제어스위치가 주제어실과 원격제어 패널에 있다.
- 하. 원자로냉각재펌프 냉각루프 회유관에서 기기냉각수 유량은 원자로냉각재펌프가 기동하기에 충분한 유량이 흐를 수 있도록 관련 냉각재펌프와 연동된다.

원자력교육원

<표 3-1> 기기냉각수계통 기기 설계 제원 (1/2)

내 용	규 격	비 고
기기냉각수펌프		
수량 / 호기	4	
종 류	수평 원심형	
용량/1대, gpm(m^3/hr)	16,000(3633.9)	
허용 연속운전 용량(gpm)	7,000~20,000	
총 수두 / 유효흡입수두, ft(m)	193(58.8) / 38(11.6)	
기기냉각수 보충펌프		
수량/호기	2	
종 류	수평 원심형	
용량/1대, gpm(m^3/hr)	280(63.59) (우회유로 30gpm 포함)	
총 수두, ft(m)	140(42.7)	
기기냉각수 열교환기		
수량 / 호기	4	
종 류	수평, 헬 직선 튜브형	
설계 열부하 Btu/hr (Kcal/hr)	250×10^6 (63×10^6)	
열 전달률, Btu/hr - ft^2 - °F	265.4	
유체(튜브측 / 동체측)	해수 / 기기냉각수	
유로 수(튜브측 / 동체측)	2 / 1	
온도, 유입/배수, °F(튜브측)	86 / 104.8 (30 / 40.4°C)	
온도, 유입/배수, °F(동체측)	141.6 / 110 (60.9 / 43.3°C)	
유량, gpm(튜브측 / 동체측)	26,000 / 16,000	
설계압력, psig ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$) (튜브측 / 동체측)	110(7.7) / 150(10.5)	
설계온도, °F(튜브측 / 동체측)	115 / 200	
재질(튜브측 / 동체측)	티타늄 / 탄소강	

[표 3-1] 기기냉각수계통 기기 설계 제원 (2/2)

내 용	규 격	비 고
기기냉각수 완충탱크		
수량 / 호기	2	
종 류	수직형	
용량, gallon (m³)	8,500 (32.2)	
운전압력, psig(kg/cm²g)	1(0.07)	
운전온도, °F(°C)	110(43.3)	
설계압력, psig(kg/cm²g)	±3(±0.21)	
설계온도, °F(°C)	200(93.3)	
재 질	탄소강	
적용코드	ASME B & PV Section III, Class 3	
기기냉각수 화학약품주입탱크		
수량 / 호기	2	
종 류	수직 원통형	
용량, gallon(m³)	90(0.34)	
운전압력 / 운전온도, psig/°F	145 / 165	
설계압력, psig / 설계온도, °F	150 / 175	
재질	탄소강	
적용코드	ASME B & PV Code Section VIII	

<표 3-2> 기기냉각수 화학성분 조건

내 용	기 준 치	비 고
수소이온농도(pH)	9.0 ~ 10.0	
염화물(Chloride)	< 1.0ppm	
부식방지제(Sodium Nitrite/Borate) 구리성분이 없는 계열 혼합계열	400~800ppm NO ₂ ⁻ 700~1,000ppm NO ₂ ⁻	
방사능	< 검출제한치	

[핵심요약]

1. 기기냉각수계통 기능

- 안전성관련 및 비 안전성관련 기기에서 발생하는 열 제거를 위하여 냉각수 공급
- 방사능 오염 가능성이 있는 계통과 기기해수냉각계통 사이에서 중간 방호벽 역할을 하는 폐쇄 순환계통

2. 기기냉각수계통 설계기준

- 원자로냉각재상실사고 등을 포함한 모든 운전조건에서 기기냉각해수계통으로 열전달 기능 유지

3. 기기냉각수계통 주요 구성기기

- 기기냉각수 펌프, 열교환기, 완충탱크 및 보충펌프
- 화학약품 주입탱크 : 기기냉각수 부식 억제제 첨가

4. 기기냉각수 공급처

- 안전성관련 기기
 - 격납용기 살수 열교환기, 정지냉각 열교환기, 비상디젤발전기 열교환기, 필수 냉방기, 사용후연료저장조 냉각 열교환기
- 비 안전성관련 기기
 - 액체폐기물계통 증발기 패키지, 봉산 농축기 패키지, 탈기기 패키지, 유출수 열교환기, 증기발생기 취출 비재생 열교환기, 원자로냉각재펌프 오일/고압/밀봉수 냉각기, 원자로냉각재펌프 전동기 오일/공기 냉각기, 1차시료 채취계통 냉각기, 복수회수탱크 배기 응축기, 격납용기 냉방기, 방사선 감시기

5. 기기냉각수계통 운전

- 발전소 모든 운전모드에서 필수 냉방기 및 사용후연료저장조 냉각 열교환기에 냉각수 공급
- 완충탱크 저 수위 시 보충탈염수계통 또는 복수저장탱크에서 보충수 공급

[핵심요약]

- 완충탱크 저-저 수위 시 비 안전성관련 기기에 냉각수 공급 차단
- 안전주입 작동신호(SAIS) 발생 시 안전성관련 기기에 냉각수 공급
 - 정지냉각 열교환기 및 격납용기 살수 열교환기에 공급 차단
 - 원자로냉각재펌프 및 전동기에 냉각수 공급
- 격납용기 살수 작동신호(CSAS) 발생 시 격납용기 살수 열교환기에 냉각수 공급
 - 원자로냉각재펌프 및 전동기에 냉각수 공급 차단
- 소외전원 상실사고 시 비상디젤발전기에서 자동으로 전원 공급

원자력교육원

제3절 1차기기 냉각해수계통

[학습목표]

1. 기기냉각해수계통의 기능을 설명할 수 있다.
2. 기기냉각해수계통의 설계기준을 설명할 수 있다.
3. 기기냉각해수계통의 주요 구성기기를 설명할 수 있다.
4. 기기냉각해수계통의 운전에 대하여 설명할 수 있다.

1. 개 요

기기냉각해수계통은 발전소 모든 운전단계에서 기기냉각수 열교환기에 냉각해수를 공급한다. 기기냉각해수계통은 일회 통과 냉각수계통으로서 2개의 100% 다중성이고 독립적인 계열로 구성되어 있다. 이 계통은 안전관련계통으로 2개의 독립적 계열로 구성된다.[그림 3-11]

2. 설계기준

- 가. 기기냉각해수계통은 설계기준사고를 포함한 모든 운전조건 하에서 기기냉각수 열교환기에 냉각해수를 공급하도록 설계되어야 한다.
- 나. 기기냉각해수계통은 기기냉각수 열교환기로 정상운전 시 최대 설계온도가 78°F(25.6℃)인 냉각해수를 공급하여야 하고, 설계기준사고 시에는 최대 설계온도가 86°F(30℃)인 냉각해수를 공급하여야 한다.
- 다. 최저 설계 해수온도는 36.3°F(2.4℃)이어야 한다.
- 라. 소외전원 상실 시 능동기기의 단일고장으로 인하여 본 계통의 안전기능이 저해되지 않도록 설계되어야 한다.
- 마. 안전정지지진 동안 및 그 이후에도 기능을 유지하도록 설계되어야 한다.
- 바. 정상 출력운전 중에 기기냉각해수계통의 능동기기를 검사 및 시험 할 수 있도록 하여야 하며, 기기의 적정 검사를 위한 설비가 제공되어야 한다.

사. 기기냉각해수계통은 최저 해수면(최저가능 수위)인 55.53ft(-3.3m)에서 최대 해수면(최대 가능수위)인 82.54ft(4.93m)의 해수 수위에서 기능이 발휘되도록 설계되어야 한다.

3. 계통설명

기기냉각해수계통은 기기냉각수 열교환기에 냉각해수를 공급하는 2개의 독립적인 안전관계열로 구성되어 있다. 기기냉각해수계통의 개략도는 [그림 3-11]과 같다. 기기냉각해수계통은 기기냉각수 열교환기에 냉각해수를 공급하는 2개의 100% 다중 계열로 구성되어 있다. 각 계열에는 2대의 100% 용량 펌프가 있으며, 이 펌프는 내진범주 I 급인 기기냉각해수 취수 구조물을 통해 최종 열제거원으로부터 냉각해수를 취하여 기기냉각수 열교환기에 공급한다. 그러나, 설계기준사고 시에는 각 계열 당 펌프 1대가 운전되어 기기냉각수 열교환기에 설계 유량을 공급한다.

기기냉각해수 배수관은 최종 열제거원으로 독립적인 배수로를 제공하기 위해 한 계열은 3호기의 순환수 배수로에 연결되고 다른 계열은 4호기의 순환수 배수로에 연결된다. 순환수 방출도관의 중단부근에 비상 방출수로가 마련되어 있어 방출도관 중 내진설계가 되어 있지 않은 부분에서 파열이 일어나더라도 비상 방출유로가 형성될 수 있게 되어있다. 최종 열제거원은 해수이다.

단, 발전소 운전 동안 기기냉각해수계통 어느 한 계열의 취수구나 두 대의 펌프가 모두 이용 불가능일 경우, 그 계열은 공통 연결관을 통하여 이용 가능한 계열로부터 냉각해수를 공급받을 수 있다.

가. 기기 설명

(1) 기기냉각 해수펌프

4대의 기기냉각 해수펌프는 각각 냉각재상실사고시 기기냉각수 열교환기에 공급되는 각 계열별 냉각 수량의 100% 용량을 가진다. 펌프는 수직 터빈형이며 미국기계학회(ASME : American Society of Mechanical Engineers) Code Section III, Class 3의 요건에 따라 제작되고, 내진범주 I 인 기기냉각해수 취수 구조물에 설치된다. 기기냉각 해수펌프는 모든 수위에서도 유효흡입수두가 보장되도록 설치된다. 기기냉각해

수 각 계열의 펌프 2대는 동일 1E급 전원을 공급받으며 각 계열은 서로 다른 모션으로부터 전원 공급을 받는다. 펌프 고장 시 격리를 위해 펌프 후단에 전동기구동 밸브가 설치되어 있다.

- 수량 : 4대/호기
- 형식 : 수직 터빈형
- 용량 : 26,000gpm/대

(2) 취수 및 배수 구조물

기기냉각해수 취수 및 배수 구조물은 최종안전성분석보고서(FSAR : Final Safety Analysis Report) 9.2.5절(최종 열제거원)에 기술되어 있다.

이 구조물은 내진범주 I 요건에 따라 설계되며 이 설계는 FSAR 3.8절에 기술되어 있다. 해수와 접하는 여러 계통 기기에 해조류 성장 및 점액으로 덮히는 것을 막기 위하여 취수구조물에 염소를 주입한다. 이동 스크린은 취수구조물로 들어오는 이물질질을 막아 줌으로써 펌프 손상을 막는다.

(3) 밸브

역지밸브 및 전동구동 격리밸브가 각 펌프 후단에 설치되었다. 각 열교환기 출구 배관의 공통 모관에는 잠금형 조절밸브가 설치되었다. 계열간의 공통 연결관에 2개의 전동구동 격리밸브가 설치되며, 안전주입 작동신호에 의해 자동 차단된다.

(4) 배관

기기냉각해수계통의 주요 배관은 건물 내부에는 폴리에틸렌으로 피복된 탄소강 배관과 모넬(Monel) 배관으로, 건물 외부에는 과 프리스트레스트 콘크리트 배관으로 되어 있다. 폴리에틸렌으로 피복된 탄소강 배관은 음극방지 설비에 의해 부식을 방지하도록 되어 있다.

(5) 기기냉각 해수여과기

각 펌프후단에 자동역세척 해수여과기가 하나씩 설치된다. 해수여과기는 기기냉각해수계통으로 유입된 이물질로 인해 기기냉각수 열교환기의 세관막힘을 방지한다.

- 수량 : 4대/호기
- 형식 : 자동 역세척형

- 용량 : 26,000gpm/대
- 역세척량 : 전체 용량의 9~10%

나. 계통운전

(1) 정상운전

(가) 발전소 모든 운전모드 중, 각 계열에서 1대의 펌프가 정상 운전되고, 나머지 1대는 대기상태를 유지한다. 양 계열에 있는 기기냉각수 열교환기에 흐르는 해수는 어떤 운전조건에서도 냉각 능력이 보장되도록 연속적으로 흐른다. 각 계열에서 기기냉각수 열교환기 후단 공통모관 밸브는 55.53ft의 최저 해수면에서 유지 시에도 26,000gpm의 용량을 유지할 수 있도록 조절된다.

(나) 한 계열의 운전 중인 펌프가 전원상실, 기타 다른 이유로 트립되면 대기펌프는 토출배관 저압감지 30초 후에 자동 기동된다.

(다) 계통 초기 기동 시 배관이 비어(Empty) 있는 상태이므로 펌프 런아웃(Runout) 조건 또는 수격작용을 방지하기 위하여 토출관 밸브의 개도가 조절된다. 용량이 기기냉각수 열교환기에 도달 시 야기될 수 있는 압력 변동을 최소화하고, 계통 내에 존재하는 공기 배기시간 여유를 두기 위하여 기동 시 유속을 3ft/sec 미만으로 유지한다.

(2) 계통정지

주제어실 제어반에서 대기 중인 펌프 핸드 스위치 정지버튼을 눌러 수동정지 상태로 하고, 정지한 각 펌프의 출구 핸드 스위치의 단힘 버튼을 눌러 밸브를 닫는다.

(3) 비정상 운전

비정상/사고 시 계통의 운전은 정상운전 시와 기본적으로 동일하다.

소외전원 상실사고 시, 운전 중인 기기냉각해수펌프는 정지하고 각 계열에서 펌프 1대가 공학적 안전설비 부하 공급절차에 따라 비상디젤발전기로부터 자동으로 전원을 공급받는다.

사고 시 또는 정상운전 중 재화용수, 청수계통의 잠재적 고장 가능 시에는 자체 유회 해수가 이용된다.

4. 안전성 평가

기기냉각해수계통에 대한 강풍과 태풍 방호는 최종 안전성 분석보고서 3.3절에, 홍수설계는 3.4절에, 비산물방호는 FSAR 3.5절에, 배관의 가상 파단에 수반되는 동적 영향의 방호는 3.6절에, 내환경 설계는 FSAR 3.11절에 기술되어 있다. 기기냉각수 열교환기에 흐르는 해수 유량은 26,000gpm(5,904.6m³/hr)이며, 이 해수 유량은 최고 가상 기기냉각 해수온도에 의해 결정된다. 기기냉각해수계통은 사고 시 계통 조건에서 이 유량이 보장되도록 설계되며, 기기냉각해수계통의 열은 최종 열제거원으로 방출된다.

기기냉각해수계통에 의해 냉각되는 기기냉각수계통은 두 개 계열의 100% 용량으로 구성되어 있으므로 기기냉각해수계통도 2개의 100% 용량 계열로 구성되어 있다. 2대의 100% 용량 펌프로 구성된 기기냉각해수계통의 각 계열은 기기냉각수계통의 각 관련 계열의 기기냉각수 열교환기에 냉각 해수를 공급한다. 두 계열간 공통연결관에는 안전주입 작동신호에 의해 자동격리 되는 두 개의 격리밸브가 설치되며, 각 밸브에는 서로 다른 1E급 전원이 공급된다. 이러한 배열로써 발전소의 전출력을 허용하기 위한, 원자로 연료나 노심의 열적 손상을 방지하기 위해, 그리고 이 계통의 한 계열을 이용할 수 없게 되거나 운전이 실패할 경우, 혹은 어떤 단일 기기의 고장 시 필수적인 공학적 안전설비의 계통 운전이 요구되는 냉각수를 공급하기 위해 충분한 열 제거능력을 보장한다.

기기냉각해수계통은 FSAR 3.2절에 기술된 바와 같이 내진범주 I 설계요건에 따라 설계된다.

기기냉각해수계통은 정상 출력운전 및 정지운전 중의 사고조건에 준하는 압력과 유량에서 계속 운전되므로, 사고조건에 준하는 압력과 유량을 주기적으로 검증할 수 있는 설비를 계통설계에 반영하였다. 따라서, 이러한 계통 운전은 모든 냉각수계통 기기의 운전성, 성능, 구조적 건전성 및 기밀 건전성을 실증해 준다.

기기냉각해수계통은 필요한 보호계통의 운전 및 정상 전원과 비상 전원간의 절환 운전과 함께 원자로정지 및 냉각재상실사고 시의 모든 운전 과정에 대한 시험을 할 수 있도록 설계되었다.

기기냉각해수계통의 주요 기기 즉 펌프, 밸브, 열교환기, 배관은 주기적 검사 및 시

힘이 용이하도록 설계되고 설치되었다. 가동 중 시험의 목적은 계통이 설계된 대로 가동되고, 최대 발전소 열부하 및 해수 온도에서 기기냉각수를 충분히 냉각시킬 수 있는 적정 유량이 공급되는 지를 확인하며, 가동 중인 기기냉각해수펌프와 대기중인 펌프가 교대 운전될 때 이들 펌프들이 정상적으로 운전되는 지를 확인하고, 정상전원이 비상전원으로 전환될 때 기기냉각해수펌프들이 정상적으로 운전되는 지를 확인하는 것이다.

기기냉각해수펌프는 최대 파도 및 해일 조건에서도 운전되도록 설계되었다. 기기냉각해수펌프는 FSAR 2.4.11.2절에 기술된 가상 최저 해수 수위에서도 충분한 유효흡입수두를 갖는다.

기기냉각해수펌프는 취수로 근처의 기기냉각해수 취수구에 위치하고 있는 수직 해수 펌프이다. 취수구에 있는 펌프 설치조의 바닥 높이는 43.5ft(-6.90m)이다. 취수장에서의 가상 최저 해수 수위는 55.53ft(-3.3m)이다. 펌프 회전자는 가상 최저 해수 수위 아래에 위치하도록 하며 펌프의 최소 잠수요건을 만족시키도록 한다.

각 계열에서 운전 중이던 펌프 1대가 소외전원 상실사고 시 순차부하 제어신호에 의해 자동 기동되며, 기동 실패 시 대기중인 펌프 1대가 자동 기동된다. 이것은 각 펌프가 100% 용량으로 설계되어 있기 때문에 각 계열에서 펌프 1대만이 운전되도록 하기 위한 것이다.

주요 기기는 내부온도가 50°F(10°C) 이상으로 유지되는 취수 구조물 내에 설치되고 건물 밖의 배관은 지하에 매설된다. 따라서 기기냉각해수계통은 결빙 방지를 위한 특별한 설비는 설치되지 않는다. 건물 외부에 있는 이물질 배출관은 배관 내의 물이 중력으로 배수되도록 경사지게 설치되어 있다.

5. 계측설비

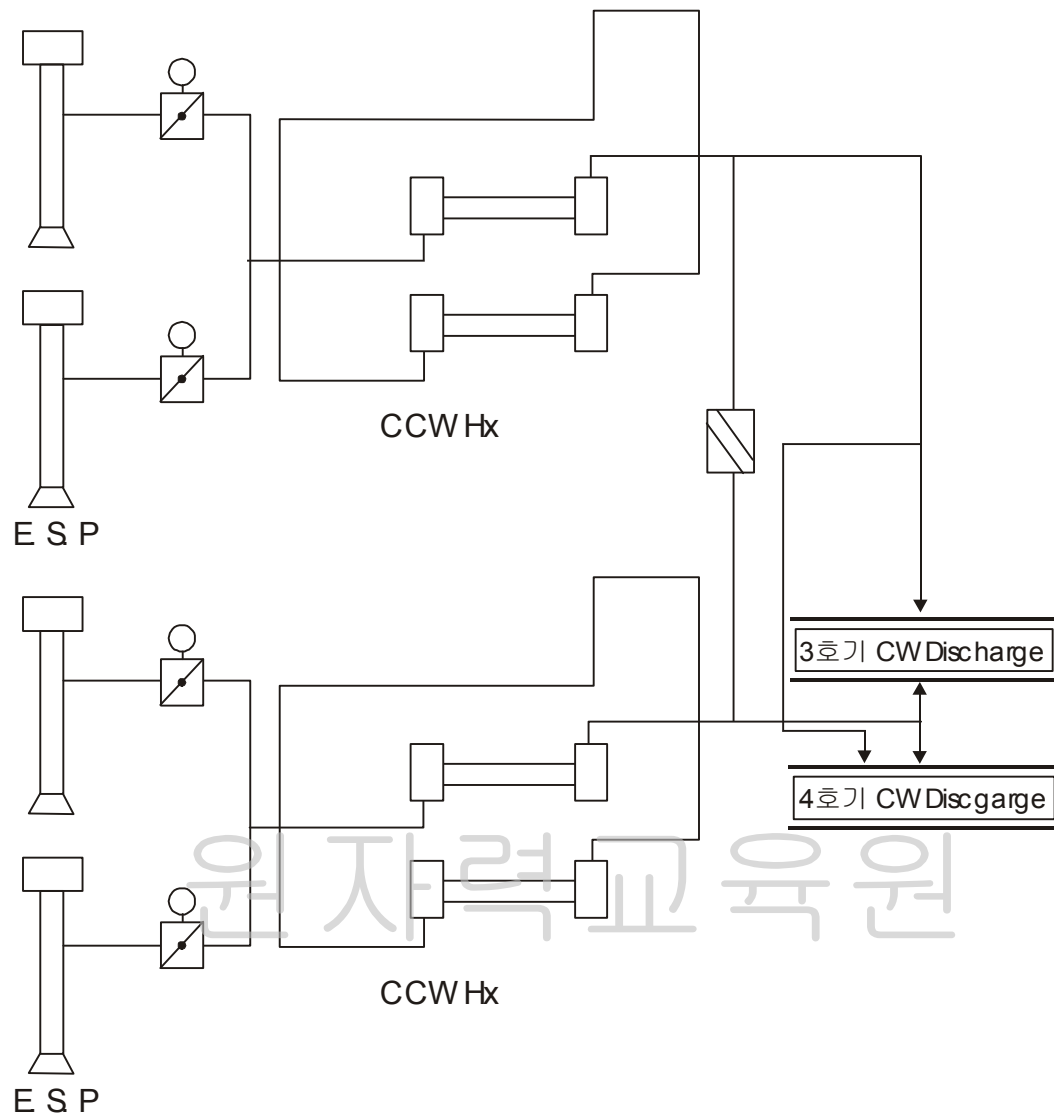
기기냉각해수계통의 성능을 확인하기 위하여 유량, 온도, 압력 감시설비가 설치된다. 기기냉각수계통이 기기냉각해수계통과 방사성 유체계통과의 사이에 중간 방벽 기능을 갖고 있기 때문에 기기냉각해수계통의 배수로에는 방사선 계측기가 설치되지 않는다. 기기냉각수계통에 대한 방사선 감시를 위해 기기냉각수 공급모관에 방사선 감시

기가 설치되었다(FSAR 9. 2. 2. 2절)

6. 제어연동

- 가. 펌프출구 전동기구동 차단밸브는 기기냉각해수펌프와 연동되어 차단밸브 개도가 15%이상 되었을 때만 관련 펌프가 기동될 수 있다. 일단 주제어실에서 밸브조작 스위치를 누르면 밸브가 개방되어 개도가 15%에 도달되면 개방이 멈춘다. 제어스위치의 개방위치를 다시 누르면 밸브는 완전 개방된다.
- 나. 펌프 토출관 압력이 낮으면 주제어실에 경보가 발생하고, 계통압력을 정상으로 회복하기 위해 30초의 시간지연을 가지고 대기펌프가 자동 기동된다.
- 다. 두 계열이 공통 연결관을 통해 모두 운전되면 펌프 런아웃(Runout)을 방지하기 위해 조그 조절(Jog Control) 밸브에 의해 유량이 조절된다.
- 라. 안전주입 작동신호가 동작되면 공통 연결관의 두 개의 전동구동 격리밸브가 자동으로 차단된다.

원자력교육원



[그림 3-11] 기기관각해수계통 개략도

[핵심요약]

1. 기기냉각해수계통 기능

- 기기냉각수 열교환기에 냉각해수를 공급하여 열을 제거하는 개방 순환계통

2. 기기냉각수계통 설계기준

- 설계기준사고를 포함한 모든 운전조건에서 기기냉각수 열교환기에 냉각해수 공급
- 최저 해수면(-3.3m) 및 최대 해수면(4.93m)에서 냉각해수 공급 기능 유지

3. 기기냉각해수계통 주요 구성기기

- 기기냉각해수 펌프 및 여과기
- 폴리에틸렌 피복 탄소강 배관 및 프리스트레스트 콘크리트 배관

4. 기기냉각해수계통 운전

- 한 계열 이용 불능 시 공통 연결관을 통하여 타 계열에서 냉각해수 공급
- 초기 기동 시 기기해수냉각펌프 출구밸브 개도 조절
 - 밸브 개도 15% 이상에서 기기냉각해수펌프 기동
- 소외전원 상실사고 시 비상디젤발전기에서 자동으로 전원 공급

원자력교육원

제4절 연료저장 및 취급계통

[학습목표]

1. 연료저장 및 취급계통의 명칭과 설치 위치를 구분할 수 있다.
2. 연료저장지역 및 취급기기의 기능을 설명할 수 있다.
3. 연료취급기기의 주요 연동장치를 설명할 수 있다.

1. 기능 및 설계기준

가. 기능

(1) 연료 저장계통

연료 저장계통은 정상상태 및 가상사고에서도 항상 충분한 미임계를 유지할 수 있는 기하학적인 배열로써 신연료 및 사용후연료를 저장할 수 있도록 되어 있다.

(2) 연료 취급계통

연료 취급계통은 신연료 취급시와 재장전 운전시 사용되는 장비, 구조물로 구성되는데 이는 연료의 인수, 검사, 저장 및 재장전, 반출 작업시 연료의 안전한 취급과 이동이 이루어지도록 되어 있다.

나. 설계기준

(1) 연료 저장계통

(가) 신연료 저장고

- 일반적인 설계기준은 10 CFR 50 APP. A의 2, 5, 61, 62를 충족해야 한다.
- 규제지침서(Reg. Guide) 1.13(사용후연료 저장시설 설계기준) 요건을 만족해야 한다.
- 저장대 및 저장시설은 지진범주(Seismic Category) I 을 충족해야 한다.
- 저장고에는 매 두개의 랙(Rack)당 하나의 신연료를 저장하고 72개의 신연료를 저장할 수 있어야 한다.
- 사고시 임계 방지를 위하여 K_{eff} 는 최대 감속 기능하에서도 미임계 증배계수

가 0.98미만을 유지하고 붕소를 포함하지 않은 물이 유입되었을 때 Keff는 0.95이하를 유지해야 한다.

(나) 사용후연료 저장조

- 일반적인 설계기준은 10 CFR 50 APP. A의 2, 4, 5, 61, 62, 63을 충족해야 한다.
- 규제지침서(Reg. Guide) 1.13(사용후연료 저장시설 설계기준) 요건을 만족해야 한다.
- 저장대 및 저장시설에 적용되는 지진범주(Seismic Category) I 을 충족해야 한다.
- 저장조에는 678개의 사용후연료를 저장할 수 있어야 한다.
- 사고시 임계 방지를 위하여 Keff 0.95를 초과하지 않아야 한다.

(2) 연료 취급계통

- 연료 취급계통은 적절한 연동과 이동제한 범위가 설정되고 보호장치가 되어 있어 기기의 잘못된 사용으로 인해 연료의 손상을 방지한다.
- 연료 및 CEA 취급장비의 설계기준은 다음과 같다.
 - 지진이 발생했을 때에도 부하가 걸린 장비가 풀리거나 낙하되지 않도록 설계된다.
 - 연료 집합체나 CEA를 이송하는 그래플(Grapple), 걸쇠(Latch) 등은 부주의한 풀림을 방지하는 연동이 되어 있다.
 - 호이스트는 기계적 정지점이 설정되어 연료가 과다하게 인출되지 않도록 한다.
 - 전원 상실시 설비나 그 부하는 안전한 상태를 유지한다.
 - 발전소 운전 중 격납건물 내의 설비는 격납건물 내부시험압력에 견딜 수 있다.
 - 전기적 연동이 되어 기기의 신뢰도를 보증하고 이동범위 및 부하가 설계조건을 초과하지 않도록 제한한다.
- 연료건물 기중기 및 격납용기 천정기중기는 부하 운전 중 안전관련 계통, 기기, 구조물 및 장비에 부하물이 낙하되지 않도록 되어 있다.

2. 계통설명

가. 연료 저장계통

(1) 신연료 저장고

신연료 저장고는 연료 건물을 구성하는 일부로서 신연료를 건식저장하는 철근 콘크리트 구조물이며 50% 저장밀도를 갖는 1개의 12×12형 저장대 모듈에 적어도 72개의 신연료 집합체를 수용할 수 있다.

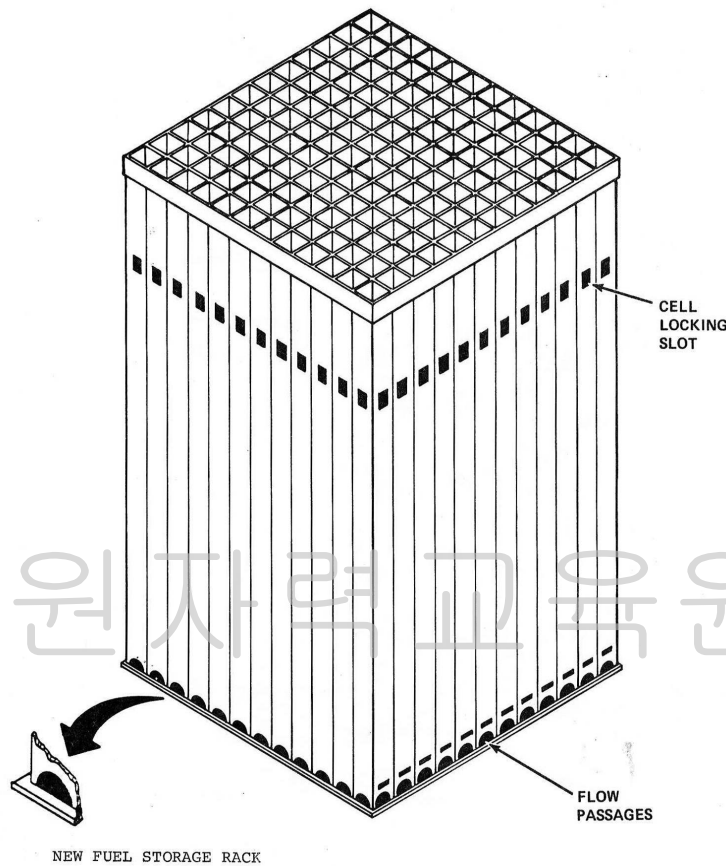
신연료 저장대는 [그림 3-12]과 같이 개개의 랙으로 구성되어 있다. 신연료 집합체는 [그림 3-14]과 같이 이용 가능한 저장랙에 “L”형 삽입물을 사용하여 서양 장기판 배열형태로 하나 건너 하나씩 저장된다. 저장대는 인접한 연료 집합체 사이에 최소한의 간격을 유지하도록 설계되는데, 이 간격은 저장대의 제작 공차 및 가상사고로 인한 예상 변형 등을 고려한 값이다. 스테인레스강으로 제작되는 저장대는 냉각수 및 지르칼로이(Zircaloy) 연료에 적합하다.

(2) 사용후연료 저장조

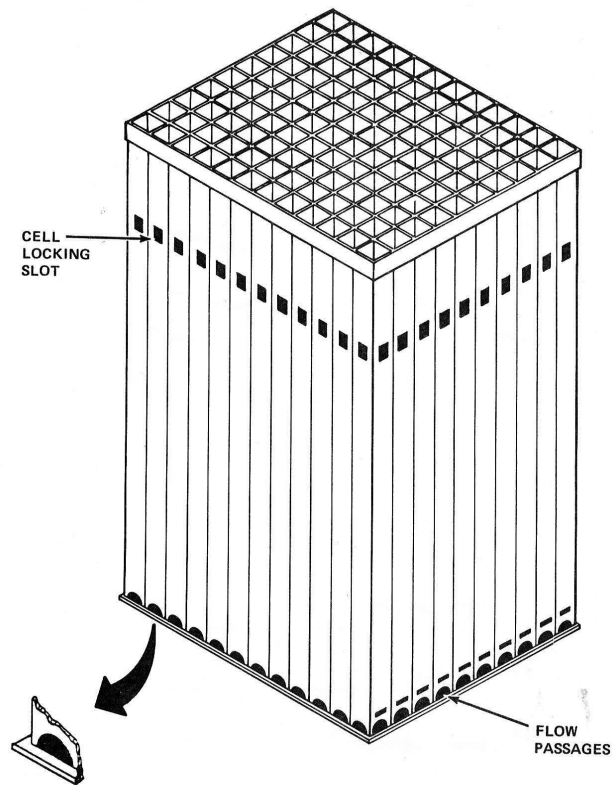
사용후연료 저장조는 연료 건물의 일부분으로서 스테인레스강 덧판이 씌워진 콘크리트 벽으로 둘러싸인 수조이며, 사용후연료 저장대는 각각 120개의 저장랙을 갖는 10×12형 모듈 9개로 구성되어 있다. 모듈이란 [그림 3-13]와 같은 연료 저장랙의 배열이다. 저장대는 정방형의 연료 저장랙들이 벌집모양으로 구성된 스테인리스강 구조물이다. 스테인리스강으로 제작되는 저장대는 연료 재료성분 및 저장조의 붕산수 환경에 맞도록 제작된다. 저장조내의 모든 저장대는 24.85cm(9.785")의 단일 피치를 가지는 랙들로 구성되어 있다.

사용후연료는 저장조내에 두 영역으로 구분하여 저장된다. 제1영역(Region I)에는 손상연료 용기(Canister)를 위한 다섯 개의 랙을 포함하여 모두 252개의 가용 랙이 있는데, 이는 전노심 인출량(177개)에다 최대 1회분의 재장전량과 예비저장용량을 합한 것과 같다. 제1영역은 이용가능한 저장랙에 “L”형 삽입물을 사용하여 서양 장기판과 같은 배열 형태의 50% 저장밀도 방식을 택하고 있다.([그림 3-14] 참조) “L”형 삽입물은 중성자 흡수물질을 사용하지 않은 스테인레스강으로 필요한 만큼의 중성자속 차폐 수격(Water gap)을 유지시킨다. 제2영역(Region II)에는 이용 가능한 저장랙

에 “L”형 삽입물을 사용하여 75% 저장밀도로 총 426개의 연료 저장랙을 제공한다. 사용하지 않는 저장랙에는 랙 차단장치를 설치하여 연료가 들어가지 못하도록 한다. 따라서 사용후연료 저장대에는 총 678개의 이용 가능한 랙이 있다. 사용후연료 저장대 및 저장조의 구조설계는 추후에 있을 수 있는 용량증대를 대비하여 중성자 흡수체 (Neutron Poison Insert)를 사용한 100% 저장시의 용량까지도 고려하여 수행되었다.

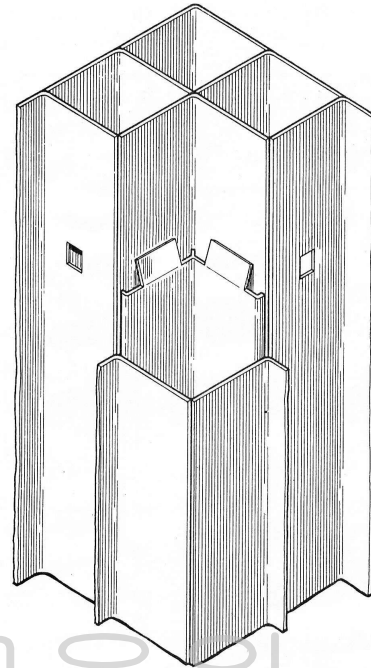


[그림 3-13] 신연료 저장대 구조(12×12 모듈)



SPENT FUEL STORAGE RACK

[그림 3-14] 사용후연료 저장대 구조(10×12 모듈)



[그림 3-15] 저장랙의 L형 삼입물

나. 연료 취급계통

(1) 연료 건물

(가) 연료 건물 천정크레인(Fuel Building Overhead Crane)

연료 건물 천정크레인은 수송용기 취급 크레인(Cask Handling Crane)과 신연료 취급 크레인(Fuel Handling Crane)으로 구성되어 있다.

수송용기 취급 크레인은 연료 건물 선적지역(Fuel Building Loading Bay), 사용후연료 수송용기 체염조(Cask Decontamination Pit)와 사용후연료 수송용기 선적조(Cask Loading Pit) 사이에서 사용후연료 수송용기를 취급하는데 사용되고, 사용후연료 저장랙 및 신연료 저장랙을 설치하는데 사용된다. 신연료 취급 크레인은 연료 건물

선적지역과 신연료 수송용기 하역지역(New Fuel Container Laydown Area) 사이에서 신연료 수송용기를 취급하는데 사용되고, 신연료 수송용기 하역지역에서 신연료 집합체를 신연료 검사지역 및 신연료 저장랙까지 이송하기 위하여 짧은 길이의 신연료 취급공구와 함께 사용된다.

2대의 크레인은 연료 건물 전체길이의 레일 위를 이동한다. 크레인의 이동은 건설기간 동안에는 제한되지 않으나 연료 장전 후에는 레일 위에 설치된 영구 기계적 정지장치에 의해 사용후연료 저장조 상부로의 이동이 제한된다. 이 장치는 기계적, 전기적 혹은 기계 및 전기적 조합으로 되어있고 브리지(Bridge), 트롤리(Trolley), 호이스트(Hoist) 이동의 자동정지를 포함하고 있으며 브리지와 호이스트 속도의 자동제어와 중량제한 및 인양 높이의 자동차단을 포함하고 있다.

(나) 사용후연료 취급기중기(Spent Fuel Handling Machine)

사용후연료 취급기중기는 [그림 3-16]와 같이 브리지, 트롤리 및 호이스트로 구성되어 있고, 신연료 저장고, 사용후연료 저장조, 재장전 수로, 그리고 신연료 수송용기 저장구역에 걸쳐 설치되어 있는 레일 위를 운행한다. 사용후연료 취급기중기는 브리지와 트롤리 모터에 의해 사용후연료 저장대, 신연료 승강기, 그리고 직립기 위로 이동되며 신연료를 신연료 저장대로부터 신연료 승강기로 운반한다.

사용후연료 취급공구는 사용후연료 취급기중기의 호이스트에 의해 지지되며, 운전원은 이 공구를 회전시켜서 운반하려는 연료 집합체를 집는다. 연료 집합체를 집은 다음에 호이스트를 끌어올리게 되며, 사용후연료 취급기중기는 신연료를 신연료 승강기에서 직립기로 운반하거나, 사용후연료를 직립기에서 사용후연료 저장대로 또는 사용후연료 저장대에서 사용후연료 수송용기로 운반한다.

사용후연료 취급기중기의 제어기는 트롤리에 위치하고 있는 콘솔에 장착되어 있다. 트롤리와 브리지의 좌표위치는 콘솔에 있는 전기 디지털 표시기에 의해 나타난다. 연료 집합체를 인출하거나 삽입하는 동안 호이스트 케이블의 하중을 관찰함으로써 인양작업이 방해받고 있지 않음을 확인할 수 있다. 하중 설정치는 연료 집합체에 손상을 주지 않도록 설정된다. 부주의에 의해 취급공구와 연료 집합체가 분리되는 것을 방지하기 위하여 확실한 잠금장치가 설치된다. 브리지와 트롤리의 구동장치는 정밀제어

에 의해 정확한 위치 이동을 하는데, 일단 이동한 위치는 제동장치에 의해 유지된다. 또한 호이스트가 연료를 인출하거나 삽입할 때 사용후연료 취급기중기가 움직이지 않도록 연동장치가 설치되어 있다. 동력이 상실되는 경우에 브리지, 트롤리, 그리고 호이스트를 작동시킬 수 있는 수동조작용 핸들이 설치된다.

사용후연료 취급기중기에는 다음과 같은 주요한 연동장치(Interlock)들이 있다.

- 호이스트 과부하(Hoist Overload) 연동장치

만일 하중이 과부하 설정치를 초과하면 인양이 중지된다.

- 호이스트 저부하(Hoist Underload) 연동장치

만일 하중이 저부하 설정치 이하로 떨어지면 하강이 중지된다.

- 인양케이블 처짐(Hoist Cable Slack) 연동장치

만일 하중이 감소하여 케이블이 느슨하게 되면 인양이 중지된다.

- 병진 속도(Translation Speed) 연동장치

인양물체가 최상위치(Full up Position) 이하에 있을 경우에 브리지와 트롤리의 병진 속도는 제한되지만 최상위치에 도달하면 고속운전이 허용된다.

- 병진 구역(Translation Zone) 연동장치

구역 연동장치는 인양물체가 벽면 쪽으로나 저장구역의 문(Gate) 쪽으로 이동하는 것을 방지한다.

이 연동장치는 사용후연료 취급기중기가 신연료 저장구역으로부터 신연료를 이송할 때 사용후연료 저장조 위로 이동하는 것을 방지한다. 벽면과 문 쪽으로 이동하는 것을 방지하기 위한 연동장치에는 어떠한 보조장치나 부가적인 회로가 제공되지 않는다.

(다) 신연료 승강기(New Fuel Elevator)

신연료 승강기는 [그림 3-17]와 같이 신연료를 작업층에서 부터 사용후연료 취급공구로 집을 수 있는 높이인 사용후연료 저장조의 바닥으로 하강시키는데 사용된다. 승강기는 케이블 윈치로부터 동력을 제공받으며, 연료는 그 바퀴가 2개의 레일에 구속되어 움직이는 이송운반차(Carriage Assembly)에 담겨진다. 신연료를 승강기에 실을 때는 사용후연료 취급기중기에 중간길이 신연료 취급공구(Intermediate Length

New Fuel Handling Tool)를 결합하여 사용한다. 동력이 상실되는 경우에 승강기를 작동시키기 위한 수동조작용 핸들이 설치된다.

신연료 승강기에는 다음과 같은 주요한 연동장치들이 있다.

- 인양케이블 처짐(Hoist Cable Slack) 연동장치
케이블이 느슨하게 되면 승강기 모터가 정지된다.
- 인양고정(Hoist Lock-out) 연동장치

연료 집합체가 승강기 내에 있을 때 승강기의 상승을 방지한다. 이 연동장치는 신연료 승강기에 사용후연료 집합체의 삽입을 금지시키는 행정적인 통제 방안에 대한 보조수단이 된다.

- 인양제한(Hoist Limit) 연동장치

상한위치나 하한위치에 도달하면 인양이 중단된다.

(라) 연료 이송계통(Fuel Transfer System)

연료 이송계통([그림 3-18] 참조)의 주요 구성품은 다음과 같이 운반상자가 장착된 이송 운반차(Transfer Carriage) 1대, 직립기(Uprighting Machine) 2대 및 수압식 동력장치(Hydraulic Power Unit) 2대, 윈치 1대 및 이송관(Transfer Tube) 등이다.

1) 이송 운반차(Transfer Carriage)

이송 운반차는 이송관을 통해 연료 집합체를 이송한다. 이송 운반차에는 연료 집합체를 담을 수 있는 이송용기가 2개 있어서 전체 연료 취급시간을 감소시킨다. 연료 집합체는 이송 운반차가 수직위치에 있을 때 삽입되어, 수평 위치로 바뀐 다음 이송관을 통해 연료 건물로 이송된 후에 다시 수직위치로 복귀된다.

이송 운반차에는 바퀴를 장착하여 이송관 내에 있는 레일 위를 운행하도록 한다. 이송관 양단에는 직립기 위에 레일의 일부를 설치하여 이송 운반차가 이송한계 위치에 적절히 위치하게 한다.

이송 운반차는 작업측에 설치된 구동윈치로부터 시브(Sheave)를 거쳐 이송 운반차에 연결된 구동케이블에 의해 구동된다. 이송 운반차는 구동케이블이 이송관 속으로 들어가지 않도록 설계되어 있다. 구동케이블에 작용되는 하중은 제어콘솔에 표시된다. 케이블이 과부하 상태가 되면 이송작업은 중단된다. 과부하에 의해 중단될 경우

에 수동으로 조작하여 이송작업을 마칠 수 있다.

2) 직립기(Uprighting Machine)

직립기는 이송관의 양쪽에 설치된다. 2개의 삽입구가 있는 연료 이송 운반차는 이를 세우는데 사용되는 골조 구조물과 맞물리고 또한 이 골조 구조물은 직립기의 지지구조물과 피봇으로 연결 된다. 이송 운반차가 직립용 골조 구조물 안에 위치할 때 이송 운반차와 직립용 골조구조물의 회전중심은 일치된다. 수압실린더는 직립용 골조 구조물과 지지구조물에 부착되며, 이송 운반차를 수직 및 수평 방향으로 회전시킨다.

각각의 수압실린더는 직립작업용으로만 설계되어 있고, 그중 1개가 고장이 나도 다른 1개가 독립적으로 작업을 수행할 수 있다. 실린더 2개가 동시에 고장이거나 수압이 상실되는 경우에 수동으로 회전시킬 수 있는 공구도 제공된다.

3) 수압식 동력장치(Hydraulic Power Unit)

수압식 동력장치([그림 3-19] 참조)는 이송 운반차와 함께 직립기를 세우고 눕히기 위한 동력을 제공한다. 수압식 동력장치에는 지지대가 설치되어 펌프와 결합된 모터, 펌프 레저버(Reservoir), 밸브, 그리고 수압실린더에 연결되는 호스가 장착된다. 밸브들을 적절하게 조합하면 직립기 실린더 1대 또는 2대 모두를 작동시킬 수 있다. 직립기 실린더에 사용되는 유체는 증류수이다.

4) 이송관(Transfer Tube)

연료 이송관([그림 3-20] 참조)은 격납건물과 연료 건물을 연결하며 격납건물에 밀봉된 관통관 내에 있는 직경 91.44cm(36") 관으로 구성된다. 이송관과 밸브의 수평이동을 수용할 수 있도록 이송관과 관통관은 용접링과 주름형 확장 조인트(Bellow-type Extension Joint)에 의해 서로 밀봉된다. 차단 플랜지(Blind Flange)는 관통관의 격납건물 쪽에 볼트 체결되는데 밀봉을 위하여 2개의 오링(O-ring)을 설치한다.

원자로 운전 중에 이송관은 격납건물 내에 위치한 차단 플랜지와 관통관에 의해 밀봉된다. 재장전 수조를 냉각수로 채우기 전에 차단 플랜지는 제거된다. 재장전 수조와 사용후연료 저장조 사이의 수위가 같아진 후에 이송관 밸브(Transfer Tube Valve)가 열린다.

연료 이송계통에는 다음과 같은 주요한 연동장치들이 있다.

- 윈치 과부하(Winch Overload) 연동장치

하중이 과부하 설정치 이상이 되면 이송관 속으로 이송 운반차 이동을 정지시킨다. 과부하는 제어반에 표시등과 경보음으로 지시된다.

- 이송 운반차(Fuel Carrier) 연동장치

직립기가 수직위치에 있을 때는 이송관을 통해 이송 운반차를 견인하지 못하게 한다.

- 직립기 회전(Upper Rotation) 연동장치

재장전 기중기나 사용후연료 취급기중기가 직립기 위치에 있을 때 직립기의 회전은 금지된다.

- 직립기(Upper) 연동장치

이송 운반차가 정확히 직립위치에 있지 않는 한 직립기의 회전은 금지된다.

- 이송 운반차 회전(Fuel Carrier Rotation) 연동장치

이송 운반차가 직립기 안에 정확히 위치하지 않는 한 이송 운반차의 회전은 금지된다.

- 이송튜브 밸브(Transfer Tube Valve) 연동장치

이송튜브의 밸브가 완전히 열리지 않는 한 이송 운반차의 이동이 금지된다.

(마) 연료 취급공구

3종류의 연료 취급공구를 사용하여 연료 건물에 있는 연료 집합체를 이동시킨다. 짧은 길이의 신연료 취급공구([그림 3-21] 참조)는 신연료를 신연료 운송용기 하역지역에서 신연료 검사구역을 거쳐 신연료 저장대로 이동하는데 사용된다. 중간 길이의 신연료 취급공구는 신연료를 신연료 저장대에서 신연료 승강기로 이동하는데 사용된다.

사용후연료 취급공구([그림 3-22] 참조)는 사용후연료와 신연료를 사용후연료 저장조 내에서 수중으로 이동하는데 사용된다.

중간 길이의 신연료 취급공구와 사용후연료 취급공구는 사용후연료 취급기중기의 트롤리에서 수동으로 조정한다. 짧은 길이의 신연료 취급공구는 연료건물 천정크

레인의 연료 취급인양기에 부착하여 조정한다.

(2) 격납용기

(가) 격납건물 천정 크레인(Containment Polar Crane)

격납건물 천정 크레인은 발전소 정비기간 동안에 원자로 용기 헤드 및 원자로 용기 내장물을 취급하는데 사용되는 것으로 격납건물 내부 벽체를 따라 360°회전할 수 있도록 원형의 레일 위에 설치된다. 격납건물 천정 크레인은 발전소 정비기간 동안 여러 가지 중량물을 취급하는 주 호이스트와 보조 호이스트를 가지고 있으며, 격납건물 내에서 중량물을 안전하게 취급하기 위한 설비가 마련되어 있다. 이 설비는 중량물의 낙하로부터 연료 손상을 방지하기 위하여 브리지와 호이스트의 자동제어, 중량제한 및 인양높이의 자동제어와 중량물 취급경로를 포함하고 있다.

(나) 연료 재장전 기중기(Refueling Machine)

재장전 기중기([그림 3-23] 참조)는 재장전 수조(Refueling Pool) 위에 위치한 이동용 브리지와 트롤리로 구성되고 재장전 수조 위의 작업층 양쪽에 평행하게 설치된 레일 위를 운행한다. 브리지와 트롤리에 설치된 모터는 원자로심이나 연료 이송 운반차 내에 있는 연료 집합체의 위치로 기기를 이동시킨다. 재장전 기중기용 제어기는 재장전 기중기 트롤리 위에 있는 콘솔(Console)에 설치된다. 브리지와 트롤리의 좌표 위치는 부호기에 의해 구동되는 디지털 출력장치를 사용하여 콘솔에 표시되는데, 부호기는 랙과 피니언 기어(Pinion gear)를 통해서 안내 레일과 연결된다.

연료 집합체를 인출하고 삽입하는 동안 콘솔에서 호이스트 케이블의 하중을 감시하여 기기의 이동상태를 확인한다. 제한치는 연료 집합체의 손상을 방지하도록 설정된다. 집게(Grapple)와 연료 집합체 사이의 잠금기능은 집게 액추에이터 암(Actuator Arm)이 연료 인양기의 축방향 홈에 물리적으로 함으로써 이루어진다. 그러므로 부주의에 의해 액추에이터에 분리신호가 발생하더라도 집게와 연료 집합체간의 확실한 물림이 유지된다.

브리지와 트롤리의 위치이동은 정밀제어를 통해 정확히 이루어지고 일단 이동된 위치는 브레이크를 사용하여 유지시킨다. 또한 호이스트가 연료를 인출하거나 삽입할 때 재장전 기중기의 이동을 방지하는 연동장치가 설치되어 있다. 인양작업 후에

브리지와 트롤리의 이동은 콘솔에 있는 연동장치 버튼을 작동하여야 가능하다.

호이스트 하단에는 재장전 기중기가 노심에서 연료 집합체를 삽입 또는 인출 할 경우 주변 연료 집합체와의 틈새를 정상 노심 간격으로 정렬시켜주는 확장장치 (Spreading Device)가 장착된다. 마스트 하단에 있는 충돌방지 장치는 마스트가 부주의에 의해 장애물로 이동되는 경우에 손상을 방지하고, 기계식 상한 정지 보장장치 (Positive Mechanical Up Stop)는 연료가 최소 안전수위(Minimum Safe Water Cover Path) 위로 인양되는 것을 방지한다. 포인터와 눈금으로 된 장치가 원격위치 지시계의 보조수단으로 제공된다. 동력이 상실되는 경우에 브리지, 트롤리 그리고 호이스트를 수동으로 운전 할 수 있게 핸들이 제공된다. 공기압이 상실되는 경우에도 집게장치는 수동으로 조작될 수 있다.

연료 재장전 기중기에는 다음과 같은 주요한 연동장치들이 있다.

- 호이스트 과부하(Hoist Overload) 연동장치

하중이 과부하 설정치를 초과하면 연료 집합체의 인출을 중단시킨다.

- 호이스트 상승정지(Hoist Up Stop) 연동장치

연료 집합체가 정확히 상한 위치(최대)에 도달하였을 때 인양을 중지시킨다.

- 호이스트 저부하(Hoist Underload) 연동장치

하중이 저부하 설정치 이하로 떨어지면 연료 집합체의 삽입을 중지시킨다.

- 호이스트 케이블 처짐(Hoist Cable Slack) 연동장치

무부하(No-load) 상태에서 호이스트의 하강을 정지시킨다.

- 호이스트 고정(Hoist Lock-Out) 연동장치

브리지와 트롤리가 병진운동을 하는 동안에 호이스트 움직임을 금지시킨다.

- 병진운동(Translation) 연동장치

확장기(Spreader)나 집게(Grapple)가 펼쳐져 있거나 노심 내에서 연료 집합체를 집고 있을 때에는 브리지와 또는 트롤리의 병진운동을 금지시킨다.

- 마스트 충돌방지(Mast Anti-collision) 연동장치

마스트에 부착된 충격 링(Collision Ring)이 주위의 물체와 접촉하여 변형될 경우에 브리지와 트롤리의 병진운동을 정지시킨다.

- 호이스트 속도(Hoist Speed) 연동장치

연료 집합체가 노심 내에서 이동할 경우에 최대 인양속도를 제한한다.

(다) 제어봉 집합체 교체대(CEA Change Platform)

제어봉 집합체 교체대([그림 3-24] 참조)는 상부 안내 구조물이 저장구역에 위치하고 상부 안내 구조물 인양장비가 제거된 후에 상부 안내 구조물 위에서 운전된다. 교체대는 재장전 기중기와 동일한 레일 위에서 운행된다. 운전원은 취급하려고 하는 제어봉 집합체 위로 교체대를 이동시킨 후 제어봉 집합체 취급공구를 교체대 호이스트에 부착하여 하강시킨 후 제어봉 집합체를 집는다.

제어봉 집합체 교체대에는 다음과 같은 주요한 연동장치들이 있다.

- 호이스트 상승정지(Hoist Up Stop) 연동장치

제어봉 집합체가 정확히 최대 상한위치에 도달하면 인양을 중지시킨다.

- 호이스트 과부하(Hoist Overload) 연동장치

하중이 과부하 설정치를 초과하면 제어봉 집합체의 인양을 중지시킨다.

- 호이스트 저부하(Hoist Underload) 연동장치

하중이 저부하 설정치 이하로 떨어지면 제어봉 집합체의 삽입을 중지시킨다.

(라) 제어봉 집합체 승강기(CEA Elevator)

원치로 구동되는 제어봉 집합체 승강기([그림 3-25] 참조)는 새로운 제어봉 집합체를 조립하고 사용된 제어봉 집합체를 해체하는데 사용된다. 제어봉 집합체는 레일 위를 움직이는 단순 구조물에 담겨진다. 승강기 내에서 제어봉 집합체를 취급하는데 사용되는 공구는 제어봉 집합체 교체대에 의해 지지된다.

제어봉 집합체 승강기에는 다음과 같은 주요한 연동장치들이 있다.

- 호이스트 케이블 처짐(Hoist Cable Slack) 연동장치

케이블이 느슨하게 되면 승강기 모터를 정지시킨다.

- 호이스트 인양고정(Hoist Lock-Out) 연동장치

승강기 안에 제어봉 집합체가 있을 때 최소 안전수위 위로 상승되지 않게 한다.

(마) 노내계측기용 절단기 및 제어봉 집합체용 절단기(Incore Instrumentation

and CEA Cutters)

조사된 제어봉 집합체를 이송용기에 넣어 연료 건물로 이동할 수 있도록 적절한 길이로 절단하기 위해 수중 공압식 제어봉 절단기가 사용된다.([그림 3-26] 참조)

(바) 원자로 용기 헤드 인양장비(Reactor Vessel Head Lifting Rig)

원자로 용기 헤드 인양장비([그림 3-28] 참조)는 제거 가능한 인양 프레임, 칼럼 및 원자로 용기 헤드에 부착된 원통으로 구성되어 있다. 이 인양장비에는 냉각공기를 유입하여 제어봉 집합체 구동기구(CEDM)가 적절한 작동온도 범위내에 유지되도록 매니폴드(Manifold System)가 포함된다.

(사) 원자로 내장물 취급장비(Reactor Internals Handling Equipment)

원자로 내장물 취급장비는 원자로 용기에서 상부 안내 구조물 또는 노심지지 구조물을 들어내는데 사용되는 장비이다.

1) 노심지지 배럴 인양장비(Core Support Barrel Lift Rig)

노심지지 배럴 인양장비의 상부 들쇠뭉치(Clevis assembly)는 삼각대 구조로 되어 있으며, 인양장비를 격납건물 천정크레인 훅(Hook)으로 연결해주는 역할을 한다. 이 인양장비 하부의 확장 빔(Spreader beam)에는 인양장비를 노심지지 배럴 플랜지에 볼트로 체결하기 위한 짧은 기둥(Column)이 세 군데 붙어 있다.

이러한 노심지지 배럴 인양장비와 노심지지 배럴의 체결은 연료 재장전 기중기 브리지 위에서 수동으로 이루어진다. 이 인양장비가 제 위치를 잡도록 하기 위한 안내축 통(Guide bushing) 두 개가 인양장비에 붙어 있으며, 이 안내축 통 속으로 원자로용기 안내편이 끼워져 들어가게 된다.([그림 3-29] 참조)

2) 상부 안내구조물 인양장비(Upper Guide Structure Lift Rig)

상부 안내구조물 인양장비에서는 상부 안내구조물 플랜지의 세 군데와 접촉하여 끌어올리기 위한 세 개의 긴 기둥(Column)을 지지구조물(Support Structure)이 지지하고 있다. 이러한 상부 안내구조물 인양장비와 상부 안내구조물의 체결은 작업대 위에서 수동으로 이루어진다. 이 인양장비가 제 위치를 잡도록 하기 위한 안내축 통이 인양장비 상부와 하부에 각각 두 개씩 붙어 있으며, 이 안내축 통속으로 원자로용기 안내편이 끼워져 들어가게 된다. ([그림 3-30] 참조)

상부 안내구조물 인양장비와 노심지지 배럴 인양장비에서 들쇠뭉치, 연결봉뭉치(Tie rod assembly) 및 확장 빔(Spreader beam)은 공동으로 사용되며, 인양장비를 사용하여 격납건물 크레인 혹은 원자로내부 구조물을 인양하기에 앞서 목적에 맞는 인양장치로 변환된다.

3. 계통운전

가. 신연료 이송

신연료 수송용기는 도착된 후에 용기 뚜껑을 제거하고, 연료 집합체의 스트롱백(Strongback)을 수직위치로 올려서 고정한다. 짧은 길이의 신연료 취급공구를 연료건물 천정크레인에 부착하여 연료 집합체를 잡고 수송용기내의 고정용 구조물을 제거한 후에 수송용기로부터 꺼낸다. 다음에 보호용 덮개를 제거하고 연료 집합체를 신연료 검사구역으로 이동한다. 검사가 끝난 신연료는 천정크레인의 신연료 취급 인양기와 짧은 길이의 신연료 취급공구를 사용하여 신연료 저장대의 지정된 랙으로 이동하여 삽입한다. 이 작업은 사용후연료 취급기중기와 중간길이의 신연료 취급공구를 사용할 수도 있다. 그리고 공구는 연료 집합체로부터 풀려지게 되는데, 이 작업은 모든 연료 집합체가 신연료 저장대속에 위치할 때까지 반복된다.

연료 재장전 작업 이전에 사용후연료 취급기중기와 중간길이의 신연료 취급공구를 사용하여 신연료를 신연료 저장대에서 인출하여 신연료 승강기로 이동시킨다. 신연료 승강기는 사용후연료 취급기중기가 연료 집합체를 지정된 높이에서 집어 사용후연료 저장대로 이송할 수 있도록 사용후연료 저장조 바닥높이에 하강시킨다. 연료 재장전 작업동안 신연료 집합체는 직립기 운반용기의 삽입구 2개 중 한 곳에 넣어진다.

나. 사용후연료 이송

사용후연료 취급기중기는 사용후연료 집합체를 저장대에서 사용후연료 수송용기(Cask)로 이송한다. 이 작업은 먼저 사용후연료 수송용기 선적조(Cask Loading Pit)를 냉각수로 채우고 저장조와 선적조 사이의 수문을 열고 나서 수행한다. 그리고 사용후연료 집합체를 사용후연료 수송용기에 담은 후 사용후연료 취급기중기를 사용후연료 저장조로 이동시키고 수문을 닫고 용기를 밀봉하고 냉각수를 배수한 다음 사용후연료

수송용기 취급 크레인(Cask Handling Crane)을 사용하여 이를 사용후연료 수송용기 제염조(Cask Decontamination Pit)로 이송시킨다.

제염조 내에서 사용후연료 수송용기의 표면은 해당 등급의 탈염수를 분무하여 세척한다. 그 후에 사용후연료 수송용기는 연료건물 출입구를 통해 중간저장시설이나 영구저장시설로 운반하기 위해 수송용기 취급 크레인을 사용하여 연료건물 선적지역으로 이송된다.

사용후연료 수송용기 선적조의 충수 및 배수와 세척 및 제염은 모두 사용후연료 저장조 냉각 및 정화계통에 의해 이루어진다.

다. 재장전 절차

원자로를 냉각시키는 동안 재장전 작업을 위한 준비가 시작된다. 재장전 작업은 제어봉 구동장치의 전자석의 전원을 차단하여 그 연결축으로부터 제어봉 구동장치를 분리함으로써 시작된다. 재장전 제어반과 제어봉 구동장치에서 제어봉 구동장치 케이블을 분리한다. 제어봉 구동장치 공기 정화기 도관과 냉각 분기관을 분리하고 원자로 용기 배기관을 제거한 후 비산물 보호구조물(Missile Shield), 제어봉 구동장치 공기정화기 및 상부지역 케이블 트레이를 제거한다.

다중 스티드 인장기를 사용하여 원자로 용기 상부덮개 스티드의 예비하중을 제거한다. 너트와 스티드가 제거된 빈 스티드 구멍에는 재장전수가 채워지지 않도록 밀봉마개를 설치한 후 원자로 용기 정렬 핀 2개를 설치한다. 제어봉 구동장치 냉각 쉬라우드의 도관에서 분리되고, 원자로 용기 배기관은 제거된다. 재장전 수조 밀봉재로 원자로 용기 플랜지와 재장전 수조 사이를 밀봉하고 원자로 용기의 공동 하부지역으로 재장전수가 유입되지 못하도록 밀봉시험을 한다. 노내계측기를 노심구역으로부터 분리, 인출시켜서 연료가 이동할 수 있도록 한다.

다음에 연료 이송관 차단플랜지(Blind Flange)가 제거된다. 그리고 재장전수가 채워지는 동안 격납용기 천정 크레인을 사용하여 원자로 용기 헤드 인양장비를 원자로 용기 헤드 위에 설치하여 원자로 용기 헤드를 보관할 위치로 옮긴다. 격납용기 재장전 수조의 수위가 연료 건물 쪽의 수위와 동일하게 되면 재장전 작업을 준비하기 위해 이송관 밸브를 연다.

상부 안내 구조물 인양장비를 상부 안내구조물에 설치하여 체결시킨 다음 상부 안내 구조물 인양에 사용된 노심지지 배럴 인양장비를 해체하여 작업층에 둔다. 그리고 제어봉과 제어봉 연결축을 같이 인출하여 연결축이 상부 안내구조물 인양장비의 작업대에 걸리도록 한다. 상부 안내구조물을 원자로 용기로부터 제거하여 상부 안내구조물 저장대 위에 놓는다. 노심 지지배럴이나 상부 안내구조물 인양장비를 재장전수조에서 이송하는 동안 사용후연료 저장조는 재장전 수조와 격리된다. 또한 재장전 기중기가 연료 집합체를 장착하고 있을 때에는 어떤 기기도 재장전 수조 위로 인양하지 못하도록 되어 있다.

다음으로 연료 재장전 기중기의 호이스트는 노심 위의 원하는 위치로 이동한다. 디지털 지시계통 및 폐회로 텔레비전 감시기능에 의해 호이스트가 연료 집합체의 상단에 정확히 정렬된다. 재장전 기중기의 호이스트가 하강한 후에도 간단한 조정은 가능하기 때문에 만일 모니터에 정렬이 잘못되었음이 표시되면 이를 교정할 수가 있다. 운전원은 집게 구동기를 동작시켜 호이스트 하단에 있는 집게를 회전시켜서 연료 집합체를 호이스트에 체결되도록 한다. 호이스트 모터가 작동되면 연료 집합체가 인출되어 연료 호이스트 통(Hoist Box) 속으로 들어가는데, 이때 통은 연료가 직립기로 이송되는 동안 보호해주는 역할을 한다. 사용후연료 집합체는 노심에서 제거된 후 재장전 수조의 이송구역으로 수중 이동되어 이송운반차의 빈 삽입구 속으로 삽입된다. 그리고 직립기에 의해 사용후연료 집합체를 수평위치로 회전시킨 뒤, 케이블 구동에 의해 레일 위에 있는 이송운반차를 이송관으로 통과시킨다. 이송관을 통과한 이송운반차는 연료 건물에 있는 직립기에 의해 수직위치로 복원된다. 사용후연료 취급기중기는 이송운반차로부터 사용후연료를 인출하여 사용후연료 저장대로 이송한다.

원자로심에서 사용후연료를 인출하여 사용후연료 저장조로 옮기는 도중 또는 그 이후에 육안검사와 초음파 검사를 실시하여 사용후연료 집합체를 검사한다. 사용후연료 검사종료 후 검사에 통과된 사용후연료와 신연료 집합체는 이송운반차에 재장착되어 이송관을 통해 재장전 수조로 이송되며, 여기서 재장전 기중기가 이들을 집어서 적절한 노심위치에 다시 삽입하게 된다.

또한 재장전 기중기는 연료 관리방침에 따라 노심 내에서 연료의 위치를 변경할 때에도 사용된다. 재장전 작업과 병행하여 노내계측기의 교체작업도 수행할 수 있는

데, 이 작업은 재장전시 마다 매회 수행되지 않을 수도 있다.

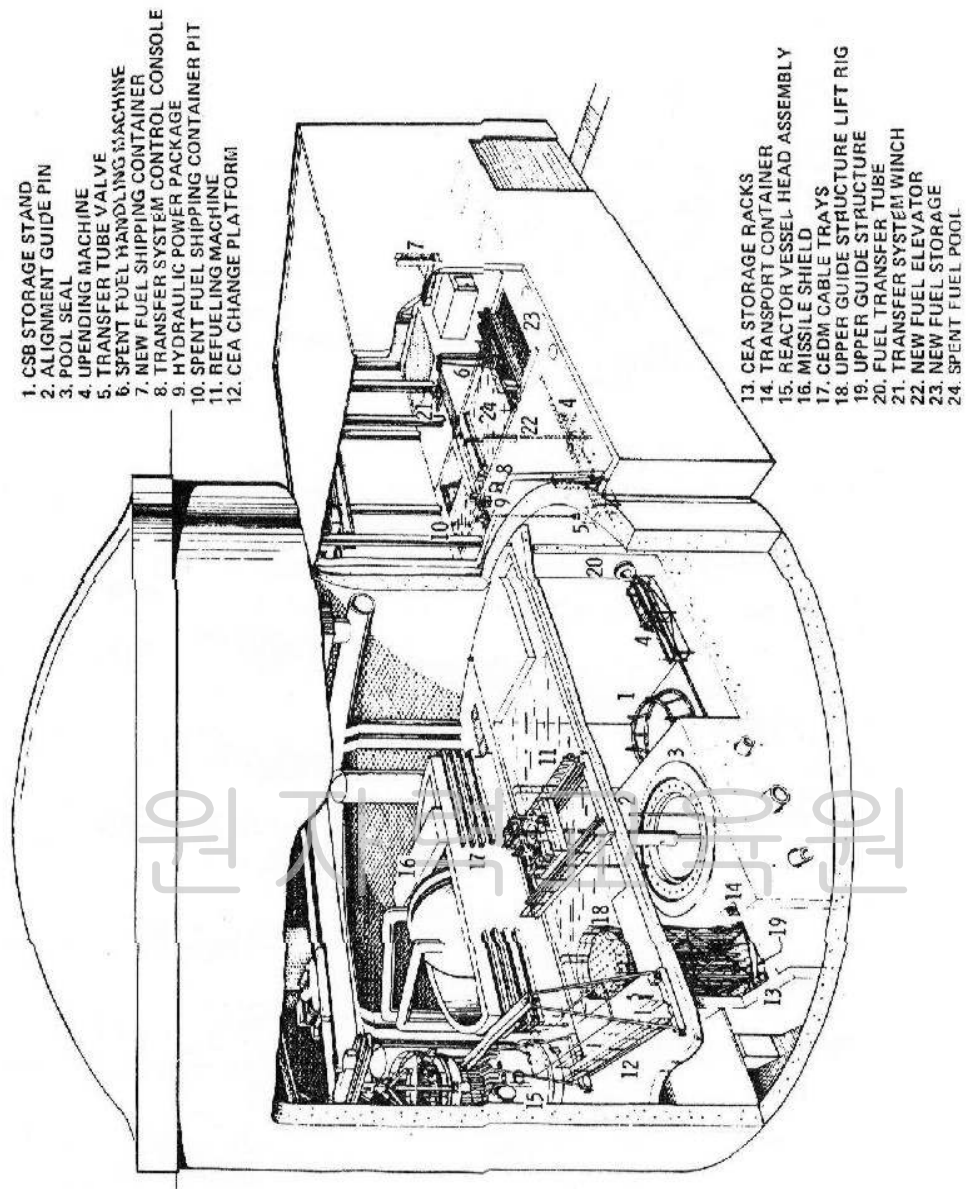
역시 이와 병행하여 연료 취급작업과 별개의 장소인 상부 안내구조물 위에서는 제어봉 집합체 취급공구와 제어봉 집합체 교체대를 사용하여 제어봉 집합체의 위치를 필요한 만큼 변경시킨다. 이 작업도 역시 재장전시 마다 수행되지 않아도 된다. 만일 새로운 제어봉 집합체가 필요하면 이 작업 중에 상부 안내구조물 속으로 삽입할 수 있다. 조사된 제어봉 집합체를 해체하기 위해서는 조사된 제어봉 집합체를 들어 올려서 상부 안내구조물 하역구역 주변에 위치한 제어봉 승강기로 옮긴 두 특수공구를 하나씩 집어 올린 뒤 수중 공압식 절단기를 사용하여 하부 463.3cm(15') 부분을 절단하여 이송용기 속에 넣는다. 제어봉 상부 152.4cm(5') 부분도 이송용기 속에 들어가는데, 이러한 작업은 모든 봉이 절단될 때까지 반복된다.

다음에 이송용기는 제어봉을 처분하기 위해 이송운반차로 이동되어 연료 건물로 옮겨진다. 재장전이 끝나면 연료 이송관 밸브를 닫는다.

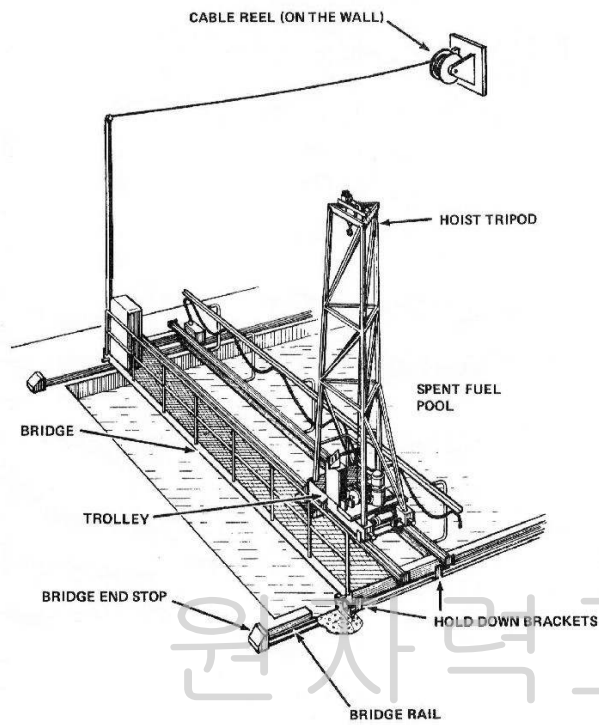
상부 안내구조물은 원자로 용기 속에 재삽입되고 제어봉 집합체들과 제어봉 집합체 연결축들 역시 제 위치에 환원되며 상부 안내구조물 인양장비는 제거된다. 재장전 수조의 냉각수는 원자로 용기 플랜지 높이까지 낮춰진다. 그 후에 재장전 수조 내에 남아있는 냉각수가 제거된다. 원자로 헤드를 제어봉 집합체 구동 연결축이 제어봉 구동장치의 노즐 깔대기 구조물에 접속될 때까지 내린다.

원자로 헤드의 하강은 원자로 용기 헤드가 제자리에 놓일 때까지 계속된다. 그리고서 스티드가 헤드에 체결되어 조립이 끝나면 이송관 차단 플랜지가 설치된다. 다음에 원자로 용기 플랜지와 재장전 수조 사이에 설치하였던 수조 밀봉재가 제거된다. 노내계측기들은 노심안으로 재삽입되고 케이블이 연결된다.

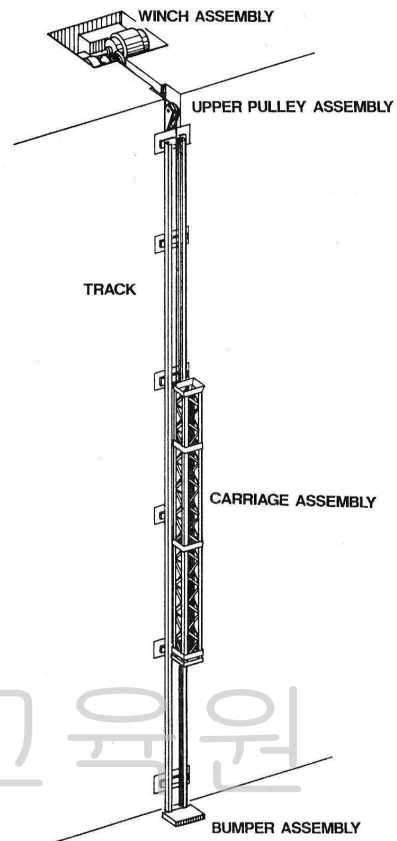
제어봉 구동장치 케이블, 비산물 보호구조물 및 제어봉 구동장치 공기취급체 등으로 구성된 상부지역 케이블 트레이가 원자로 위에 설치되고, 냉각용 도관이 분기관에 연결되고 제어봉 구동장치 케이블 트레이가 원래의 위치에 설치된다. 또한 원자로 배기관이 설치되고 비산물 보호구조물이 원래의 위치에 설치된다.



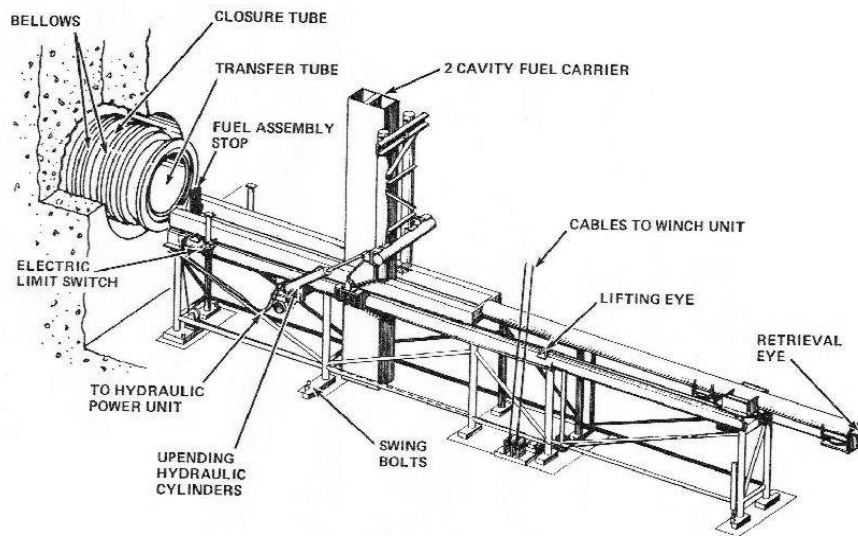
[그림 3-16] 연료 저장 및 취급계통 배치도



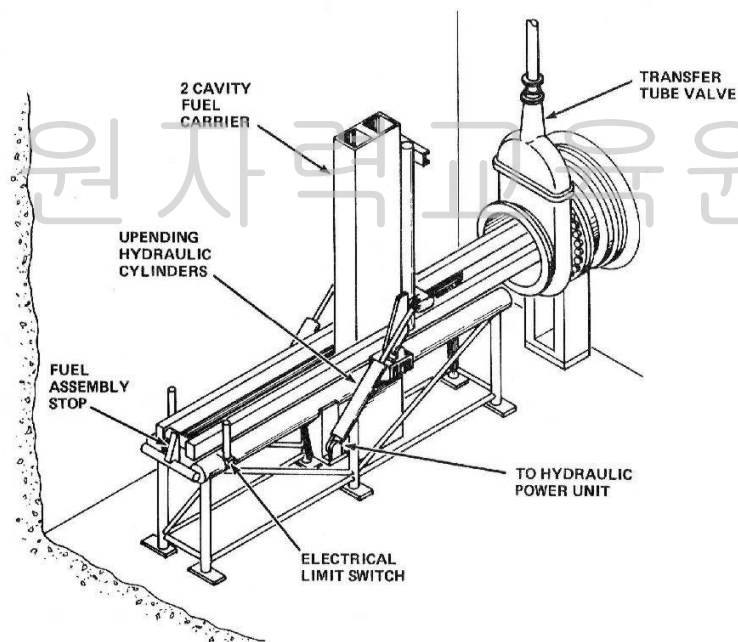
[그림 3-17] 사용후연료 취급기중기



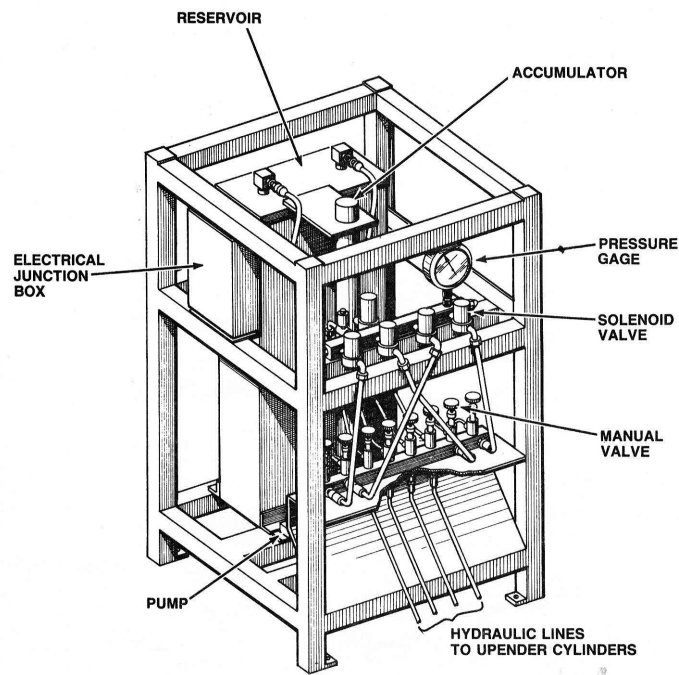
[그림 3-18] 신연료 승강기



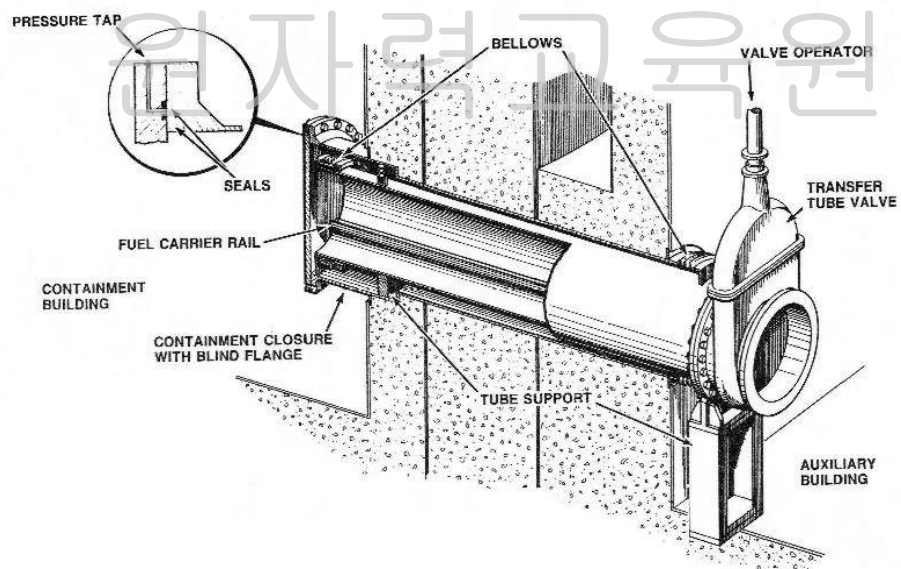
[그림 3-19 ①] 연료 이송계통 - 원자로 건물측



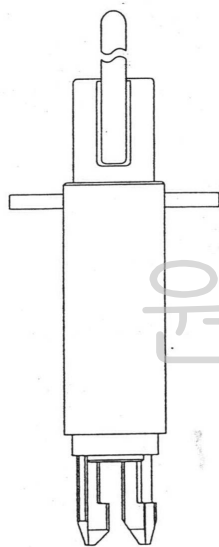
[그림 3-18 ②] 연료 이송계통 - 연료 건물측



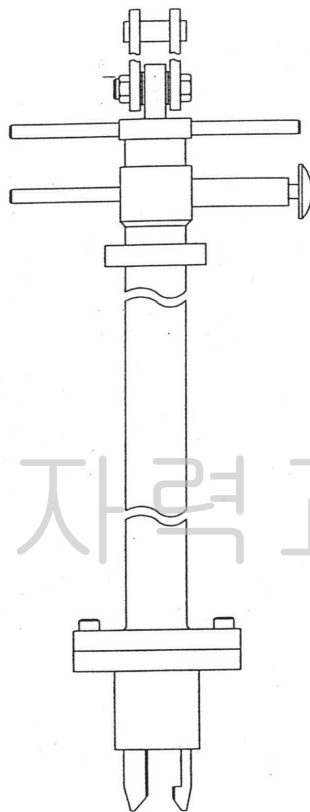
[그림 3-19] 연료이송계통 직립기 수압식 동력장치



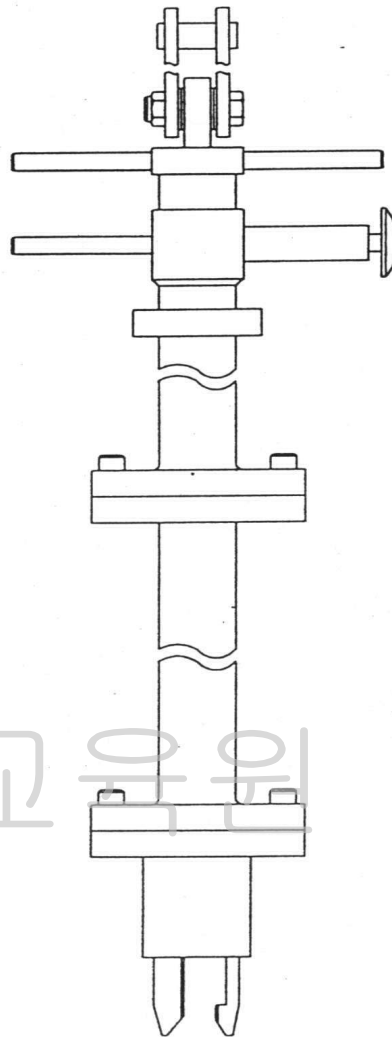
[그림 3-20] 연료이송계통 이송관



〔그림 3-21 ①〕
짧은 길이 신연료
취급공구

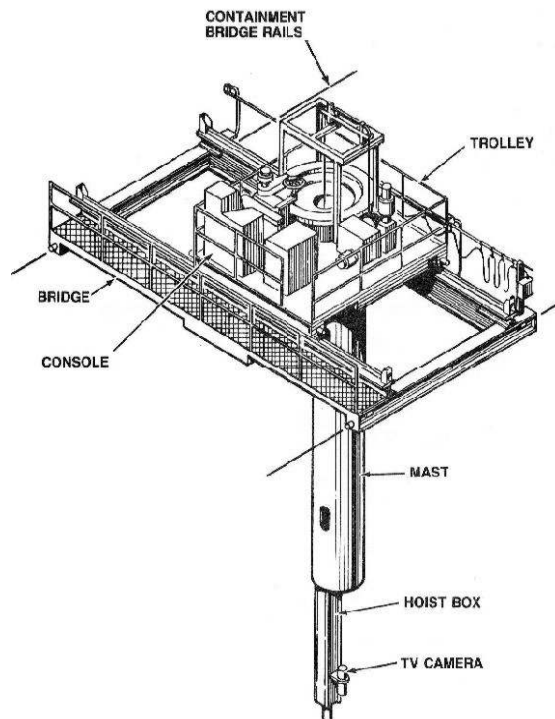


〔그림 3-21 ②〕
중간 길이신연료 취급공구

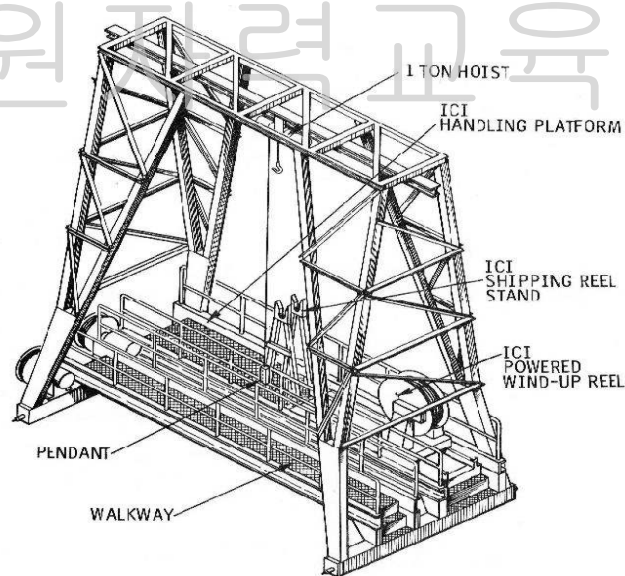


SPENT FUEL HANDLING TOOL

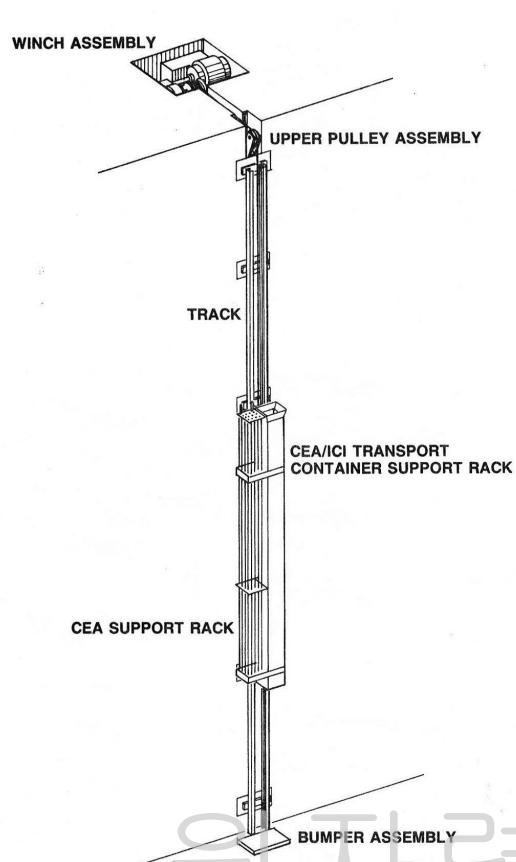
〔그림 3-22〕
사용후연료 취급공구



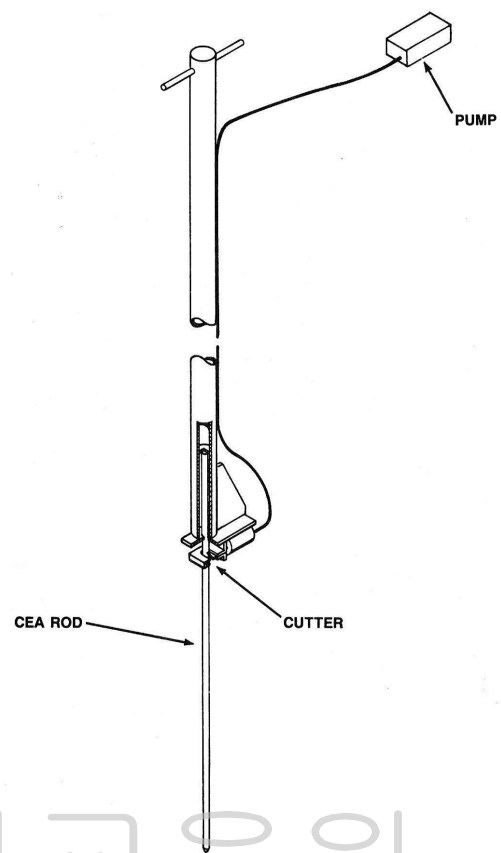
[그림 3-23] 연료 저장전 기중기



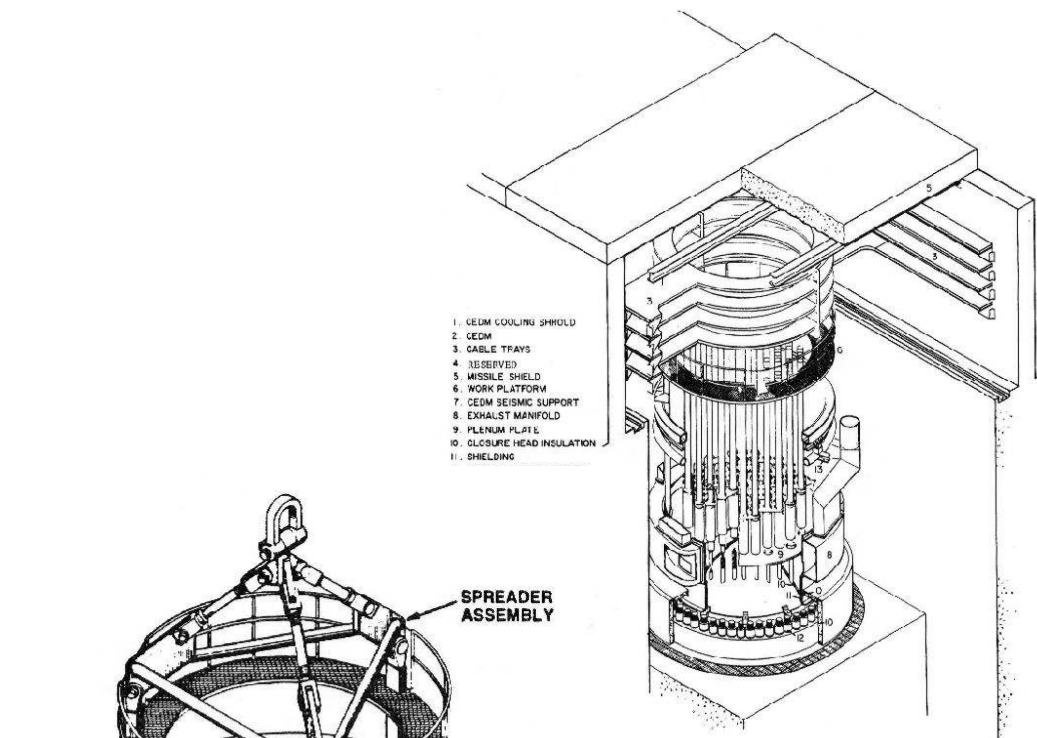
[그림 3-24] 제어봉집합체 교체대



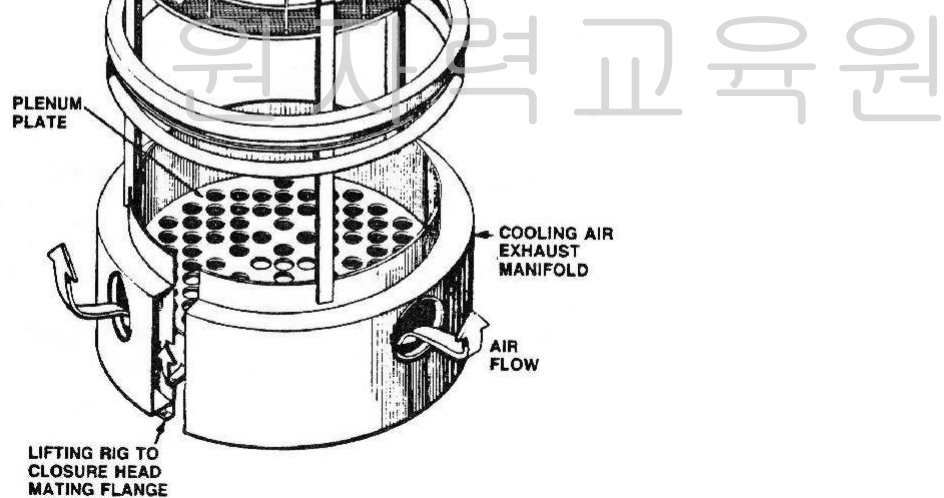
[그림 3-25] 제어봉 집합체 승강기



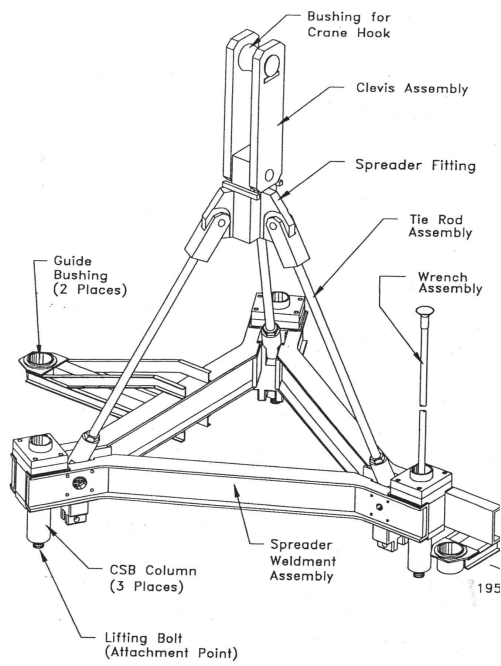
[그림 3-26] 제어봉 집합체 절단기



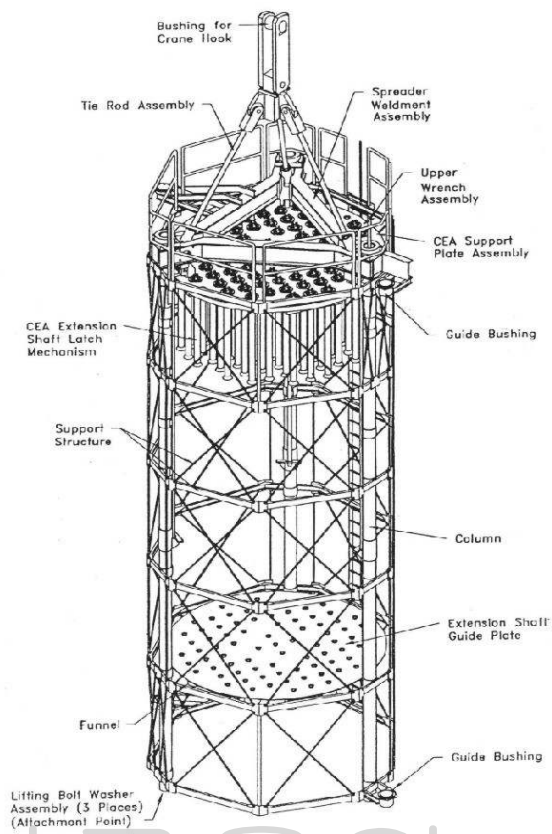
[그림 3-27] 원자로용기 헤드



[그림 3-28] 원자로용기 헤드 인양장비



[그림 3-29] 노심지지 배럴 인양장비



[그림 3-30] 상부안내구조물 인양장비

[핵심요약]

1. 연료저장 및 취급계통 배치

○ 연료저장계통

- 연료건물 : 신연료저장고, 사용후연료저장조, 선적조, 제염조
- 격납건물(원자로건물) : 원자로, 재장전 수조
- 연료건물~격납건물 : 연료이송수로

○ 연료취급계통

- 연료건물 : 연료건물기중기, 사용후연료취급기중기, 신연료승강기, 연료취급공구
- 격납건물 : 격납용기천정기중기, 재장전기중기, 제어봉집합체교체대, 제어봉집합체승강기
- 연료건물~격납건물 : 연료이송설비

2. 연료저장지역 및 취급기기 기능

○ 연료저장지역

- 신연료저장고 : 신연료 저장
- 사용후연료저장조 : 사용후연료 냉각 및 방사선 감쇠, 신연료 임시저장
- 선적조 : 수중에서 사용후연료수송용기에 사용후연료 적재
- 제염조 : 사용후연료수송용기 외부 반출 전 용기 제염
- 연료이송수로 : 연료건물과 격납용기 사이의 신/사용후연료 이송통로
- 재장전 수조 : 연료 및 제어봉집합체 교체장전 작업 공간

○ 연료취급기기

- 연료건물기중기 : 신연료 및 사용후연료 저장랙, 신연료 및 사용후연료 수송용기 등 중량물 취급
- 사용후연료취급기중기 : 연료건물 내 신연료 및 사용후연료 위치 이동
- 신연료승강기 : 신연료를 신연료저장고에서 저장조 바닥까지 위치 이동
- 연료취급공구 : 사용후연료취급기중기와 결합하여 신/사용후연료 이동
- 연료이송설비 : 연료건물과 격납용기 사이의 신/사용후연료 이송

2. 연료저장지역 및 취급기기 기능

○ 연료취급기기(계속)

- 격납용기천정기중기 : 격납용기 내 원자로 용기 헤드 및 내장물 등 중량물 취급
- 재장전기중기 : 원자로심 내 연료장전/인출, 원자로~이송운반차 사이의 연료 이송
- 제어봉집합체교체대 : 신/사용후 제어봉집합체 교체
- 제어봉집합체승강기 : 신/사용후 제어봉집합체 조립 및 해체

3. 연료 취급기기 주요 연동장치

○ 사용후연료취급기중기, 재장전기중기

- 호이스트 과부하 : 연료인출시 손상방지를 위해 과부하 설정값 초과시 인양 중지
- 호이스트 저부하 : 연료장전시 손상방지를 위해 저부하 설정값 초과시 하강 중지

○ 신연료승강기, 제어봉집합체승강기

- 호이스트 인양고정 : 신/사용후연료(신/사용후제어봉) 삽입시 승강기 상승 방지

○ 연료이송설비

- 이송운반차 : 직립기 수직위치일 때 이송운반차 이동 정지
- 직립기 회전 : 직립기 상부에 재장전기중기 또는 사용후연료취급기중기 위치하면 직립기 회전 금지
- 이송튜브 밸브 : 이송튜브 밸브 개방시 이송운반차 이동

제4장 원자로 안전설비

제1절	공학적인안전설비 개요	173
제2절	격납용기계통	190
제3절	안전주입계통	198
제4절	정지냉각계통	213
제5절	격납용기살수계통	230
제6절	보조급수계통	242

제1절 공학적안전설비 개요

[학습목표]

1. 공학적안전설비의 기능, 설계특성, 목표 및 구성을 이해하고 설명할 수 있다.
2. 원자력발전소의 물리적 방벽에 대해서 이해하고 설명할 수 있다
3. 공학적안전설비의 작동신호를 이해하고 설명할 수 있다.
4. 원자력발전소의 상태 구분을 이해하고 설명할 수 있다
5. 원전 사고/고장 등급을 이해하고 설명할 수 있다.

1. 공학적안전설비의 기능

원자로냉각재상실사고(LOCA)와 같은 원자력발전소의 설계기준사고(DBA) 발생시에 원자로냉각재계통으로부터 핵분열생성물의 누출을 차단하여 발전소 종사자와 발전소 주변지역 주민의 안전을 확보하기 위하여 다음과 같은 기능을 갖는다.

가. 핵연료피복재 보호

- 연료중심 온도 $\leq 2,590^{\circ}\text{C}$ ($4,700^{\circ}\text{F}$)
- 연료피복재 표면 온도 $\leq 1,204^{\circ}\text{C}$ ($2,200^{\circ}\text{F}$)

나. 격납용기건전성 확보

- 격납용기 내부 H_2 함유량 $\leq 4\text{w/o}$
- 격납용기 대기를 설계 온도 및 압력 이하로 유지
- 방사성물질 함유량을 제한치 이내로 유지

다. 격납용기 내 방사성물질 제거

- 방사성물질 함유량을 제한치 이내로 유지한다.

라. 주제어실 건전성 확보

- 주제어실 내부 온도, 습도 및 방사능준위를 제한치 이내로 유지한다.

마. 냉각재재고량 확보

- 원자로냉각재상실사고(LOCA)와 같은 설계기준사고시 손실된 냉각재재고량을 확보하여 노심을 냉각한다.

바. 자연순환 및 1차측 냉각

- 증기발생기에 보조급수를 공급하여 열제거원을 확보함으로써 핵증기공급계통(NSSS)을 냉각한다.

2. 설계특성

가. 다중성(Redundancy)

어느 한 계열(Train)이 기능을 상실하였을 때 나머지 다른 계열이 본래의 설계기능을 충분히 발휘할 수 있도록 한다. 즉 같은 기능을 수행하는 계열이 두 계열 이상으로 구성되어 한 계통의 다중성을 갖도록 설계되었다.

나. 독립성(Independency)

한 계열의 사고가 다른 계열에 영향을 미치지 아니하도록 물리적 또는 전기적으로 상호 분리되어 독립성을 유지할 수 있도록 설계되었다.

다. 안전성(Fail to Safe)

안전관련계통 기기들이 수동적(Passive)으로 고유의 기능을 상실하였을 때 그 결과로 인한 기기의 상태가 노심의 안전한 방향으로 최종동작이 이루어지도록 설계되었다.

라. 다양성(Diversity)

동일한 기능을 수행하는 서로 다른 시스템을 설치하여 안전성을 증대시키거나 프로세스(Process)의 변수들을 감시하기 위하여 둘 이상 서로 다른 측정기기를 사용하도록 설계되었다.

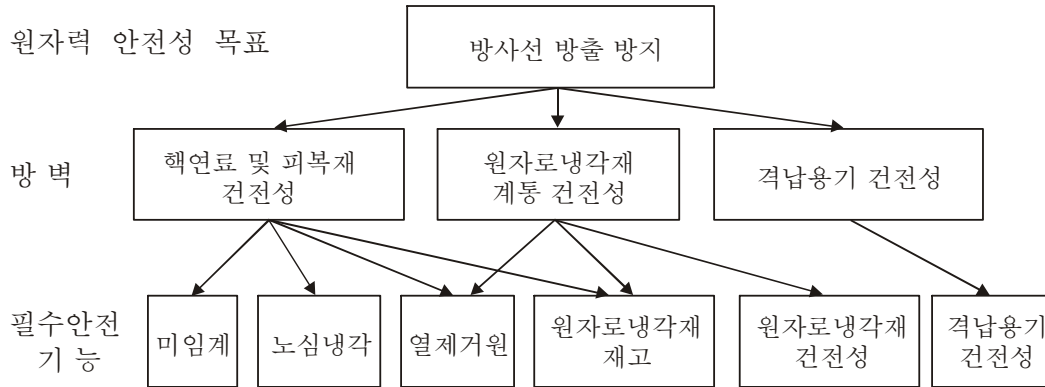
마. 시험성(Testability)

출력운전 중 안전계통의 불필요한 동작 또는 기능상실없이 시험 또는 교정을 할 수 있도록 설계되었다.

3. 공학적안전설비의 목표

가. 연료 및 피복재 보호

- 미임계상태 유지 : 연료의 열생성 최소화



[그림 4-31] 공학적안전설비의 목표

- 노심냉각 유지 : 연료의 발생열을 제거하기 위한 적절한 냉각재 제공
- 열제거원 확보 : 연료의 발생열을 제거하기 위한 2차측 냉각재 제공
- 원자로냉각재 재고량 확보 : 냉각재의 효과적인 열제거 및 압력제어

나. 원자로냉각재계통 압력경계 보호

- 열제거원 확보 - 원자로냉각재의 적절한 열제거능력 제공
- 원자로냉각재계통 건전성 유지 - 원자로냉각재계통 파단방지
- 원자로냉각재 재고량 제어 - 과충수 및 압력제어능력 상실방지

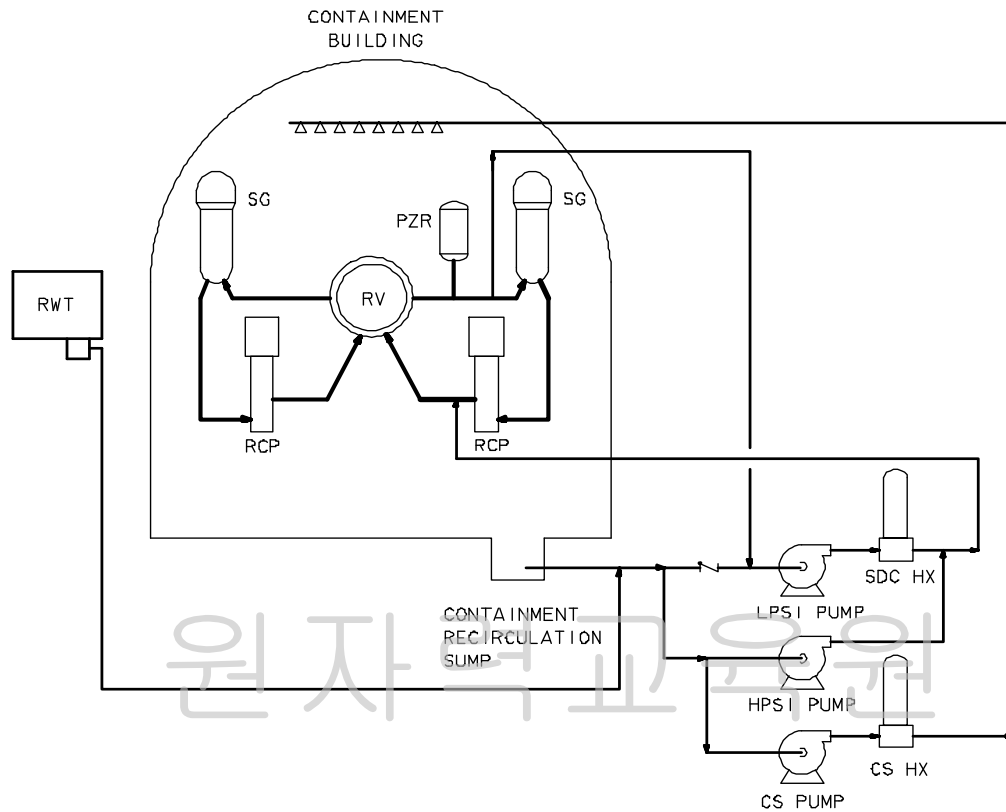
다. 격납용기 보호

- 격납용기 건전성 확보 - 격납용기를 과압 및 고온으로부터 보호하여 격납건물 외부로의 방사성물질 누출억제

4. 공학적안전설비의 구성

- 격납용기계통
- 격납용기살수계통

- 비상노심냉각계통
- 보조급수계통
- 핵분열생성물 제거 및 제어계통



[그림 4-32] 공학적안전설비 개념도

가. 격납용기계통

(1) 개요 : 격납용기계통은 공학적안전설비계통의 일부로서

- 격납용기건물
- 격납용기 열제거
- 격납용기 공기정화 및 청정유지

- 격납용기 격리
- 격납용기 가연성기체 제어로 구성
- LOCA, MSLR, FWLR 등 최대 가상사고시 사고의 완화 및 억제위해 높은 신뢰성을 갖춘 기기로 구성
- 격납용기계통의 궁극적 목적은 원자로 노심 및 원자로냉각재계통에서 누출되는 방사능의 외부누출을 최소화한다.
- 설계 압력 및 온도 : 4.0kg/cm^2 / 140°C

(2) 안전설계 기준

- 설계기준사고(DBA)시 방사능물질 방출은 10CER100에서 규정한 제한치 이내 유지
- 설계기준사고시 온도 및 압력에 견딜 수 있어야 함
- 설계기준사고 발생 후 24시간 동안 누설량이 격납용기 공기용적의 0.2v/o를 초과하지 아니하며, 그 이후부터 24시간 동안 설계누설량이 0.1v/o를 초과하지 않아야 된다.

(3) 관련 부속계통

(가) 격납용기열제거계통 - 격납용기살수계통

- 사고 후 열제거
- 격납용기 대기로부터 방사성 옥소(Iodine)제거

(나) 격납용기격리계통

- 격납용기 격리신호(CIAS) 발생시 제어되지 않은 방사능 물질이 환경으로 누출되는 것을 방지하기 위하여 격납용기 관통배관 격리

(다) 가연성기체 제어계통

- 설계기준사고시 물의 방사화, 격납용기 내부의 재질 부식, 핵연료 피복재의 지르코늄(Zr)과 물이 반응할 때 발생하는 수소를 제어하는 계통
- 수소재결합계통 : 가상사고 발생 후 수소농도를 격납용기 내부 공기용적에 대한 체적비 4% 이하로 제거함
- 수소감시계통(Hydrogen Monitoring System) : 사고 후 격납용기 내부 대기

중의 수소농도를 감시

- 수소혼합계통(Hydrogen Mixing System) : LOCA 후 격납용기 내의 국부적인 수소농도가 4.5w/o를 넘지 않도록 함

(라) 격납용기 공기정화 및 청정계통

- 저용적폐지계통 : 정상운전 중 격납용기 대기정화
- 고용적폐지계통 : 핵연료재장전 작업 중 격납용기 대기정화
- Post-LOCA Purge System : 사고 후 가연성기체를 제거하고, 사고 후 격납용기 대기정화에 사용

나. 격납용기살수계통

(1) 기 능

- (가) 냉각재상실사고(LOCA), 주증기 또는 주급수관 파단사고시 격납건물 대기의 압력, 온도 상승을 제한하고, 격납용기 대기로부터 제거된 요오드(I)를 격납용기 배수조(Sump) 내에 수용상태로 유지하여 분열생성물을 제거함
- (나) 사고 후 4시간 안에 Tri-Sodium Phosphate(TSP)를 사용하여 격납용기재 순환집수조의 pH를 7~8.5로 유지한다.(격납용기 내부 오스테나이트계 스텐레스강의 응력부식 억제)
- (다) 8시간 이내에 격납용기 집수조 내의 물온도를(109℃)이하로 감소
- (라) 정지냉각계통 보조 기능
- (마) 비상노심냉각계통과는 독립적으로 열제거 기능을 수행하도록 설계

(2) 구 성

- 100% 용량의 두 계통으로 구성
- Containment Spray Pump
- Containment Spray Heat Exchanger
- Main Spray Header - Nozzle : 230개/계열
- Auxiliary Spray Header - Nozzle : 80개/계열
- 격납건물 하부의 TSP 저장 Bucket 포함 : 16개
- 관련 밸브 및 파이프

(3) 운 전

(가) 정상운전

- 발전소 정상운전시 대기상태(Stand-by) 유지

(나) 주입 모드(Injection Mode)

RWT → CSP → CS Hx → CS Nozzle → CV Recirculation Sump
↘ CS Auxiliary Nozzle ↗

(다) 재순환 모드(Recirculation Mode)

- RAS 발생시 재순환 모드운전

CV Recir. Sump → CSP → CS Hx → CS Nozzle → CV Recir. Sump
↘ CS Auxiliary Nozzle ↗

- RWT 최소 재순환 밸브는 배수조의 물로 인한 오염방지 및 비상 노심냉각펌프 흡입원 상실방지를 위해 닫힌다.

다. 비상노심냉각계통(Safety Injection)

(1) 기 능

공학적안전설비(ESFAS)의 핵심부인 안전주입계통은 원자로냉각재상실사고(LOCA) 또는 증기과잉방출사고(ESDE) 등 설계기준사고(DBA)시 노심냉각 및 정지여유도를 확보한다.

- 냉각재상실사고시 냉각재유량 차단에 따른 피복재의 손상방지
- 핵연료 다발의 원형 유지
- 핵연료피복재와 냉각재의 반응을 제한
- 노심냉각과 미임계 유지를 위한 붕산수 공급
- 냉각재상실사고 후 장기 노심냉각 수단제공
- 계통의 과잉냉각으로 인한 정반응도 삽입시 붕산수를 주입하여 충분한 정지여유도를 확보한다.
- 동작신호
 - 가압기 저-압력 : 124kg/cm²a
 - 격납용기 고-압력 : 133cmH₂O

(2) 운전모드

(가) 주입모드

1) 고압안전주입계통(능동적 주입)

○ 유 로

재장전수탱크 → 고압안전주입펌프 → 원자로냉각재 저온관
1A,1B(2A,2B)

2) 저압안전주입계통(능동적 주입)

○ 유 로

재장전수탱크 → 저압안전주입펌프 → 원자로냉각재 저온관
1A,1B(2A,2B)

- 원자로냉각재 압력이 200psig까지 감압되면 저압안전주입 수행

3) 안전주입탱크(수동적 주입)

- 안전주입탱크는 질소(N_2) 개스로 가압되어 원자로냉각재 압력이 안전주입탱크 압력 이하로 감소되면 수동적(Passive)으로 주입된다.

(나) 단기 재순환 모드

○ 유 로

격납용기집수조 → 고압안전주입펌프 → 냉각재계통 저온관

※ 저압안전주입펌프는 격납용기재순환(RAS)모드에서 정지됨

- 동작신호 : 재순환작동신호(RAS) - RWT 저-수위(7.6%)

(다) 장기 재순환 모드

- 유 로 : 격납용기집수조 → 고압안전주입펌프 → 냉각재 저온관
↳ 냉각재 고온관

- 동작신호 : 수동(안전주입 발생 후 4시간 이내에 정지냉각이 불만족시)

(3) ECCS 안전설계 기준

- 비상노심냉각계통은 폭풍, 해일 및 외부 비산물 등 자연재해로부터 보호되도록 설계되었다.

- 비상노심냉각계통은 안전정지지진(SSE)이 발생한 후에도 고유설비 기능을 갖도록 하였다.
- 비상노심냉각계통은 한 계열이 기능을 상실하고 외부로부터 전원공급이 상실되더라도 고유의 기능을 수행할 수 있다.
- 능동적 구성요소들은 계통이 운전될 때에도 기능점검을 수행할 수 있다.
- 비상노심냉각계통은 모든 사고 이후의 상황에서도 기능을 발휘 할 수 있다.
- 비상노심냉각계통은 10CFR50.46의 설계기준을 만족한다.

(4) 비상노심냉각계통 설계기준(10CFR50.46)

<표 4-3> 노심냉각계통 설계기준(10 CFR 50.46)

항 목	제 한 치	목 적
피복재의 표면 최대온도 (Cladding Peak Temp)	$\leq 2200^{\circ}\text{F}$	피복재의 손상방지 (물과 Zr의 급격한 반응 방지)
피복재의 산화 (Cladding Oxidation)	피복재 두께의 17% 이하	피복재의 국부적인 감소와 연성의 과잉손상 방지
수소 발생 (H_2 Generation)	노심 내의 전체 Zr이 물과 반응하여 생성될 수 있는 수소 가상량의 1% 이내	노심을 통과하는 냉각재의 차단에 따른 피복재의 손상방지
기하학적 형상 (Geometry)	핵연료 다발을 원형 그대로 유지하여 냉각이 가능하도록 한다.	노심을 통과하는 냉각재의 차단에 따른 피복재의 손상방지
장기노심냉각 (Long term Core Cooling)	장기간에 걸쳐 노심을 냉각시킴으로써 노심의 붕괴열을 제거	부가적인 노심손상을 방지하기 위해 붕괴열 제거능력 확보

라. 보조급수계통

(1) 기 능

주급수상실시 노심손상 방지 및 잔열제거를 위한 보조급수를 공급한다.

- 냉각운전시 : 발전소 고온대기상태 유지와 정지냉각계통 연결시점까지 잔열제거를 위한 보조급수 공급
- 기동 및 정지시 : 주급수계통과 병행하여 급수공급의 다중화

(2) 설계기준

- 주급수 상실사고시 증기발생기에 충분한 냉각수를 공급한다.
- 각각의 보조급수부속계통은 해당 증기발생기에 급수를 공급 할 수 있도록 배열되어 있고, 정지냉각계통 운전시점까지 발전소를 냉각시키기 위해 충분한 보조급수를 공급한다.
- 총 보조급수 유량은 대기로 방출되는 증기량과 증기 수축을 고려한다.
- 흡입측으로부터 전동기구동 보조급수격리밸브까지 내진범주 I 등급
- 보조급수계통 흡입원
 - － 복수 저장탱크
 - － 탈염수 저장탱크
 - － 원수 저장탱크

(3) 구 성

- 전동기구동 보조급수펌프 2대
- 터빈구동 보조급수펌프 2대
- 정격용량 : 550gpm(Mini Flow 제외)
- 회전수(모터/터빈) : 3,579rpm/7,870rpm

마. 핵분열생성물 제거 및 제어계통

(1) 핵연료건물 비상배기계통

(2) 주제어실 비상보충계통

(3) 비상노심냉각 기기실배기계통

5. 물리적 방법

<표 4-4> 물리적 방법

방벽구분	구 성 설 비	ESF 설 비
제1방벽	펠렛 및 피복재	<ul style="list-style-type: none"> ○ 비상노심냉각계통 : 냉각 및 미임계유지 ○ 보조급수계통 : 노심냉각을 위한 자연순환용 열제거원 제공
제2방벽	원자로용기를 포함한 냉각재 계통 압력경계	<ul style="list-style-type: none"> ○ 가압기안전밸브 : 냉각재계통의 과압보호 ○ 비상노심냉각계통 : 냉각재의 재고량 확보
제3방벽	격납용기	<ul style="list-style-type: none"> ○ 격납용기살수계통 : 격납용기 대기압력 및 온도 감소 ○ 수소결합기 및 수소제어계통 : 격납용기 내부 수소농도 제어 ○ 격납용기격리계통 : 사고영향 확대방지 및 방사능물질 외부 누출억제

6. 공학적안전설비 작동신호(ESFAS)

가. 핵증기공급계통(NSSS)

<표 4-5> 주증기 격리신호

주증기격리신호(MSIS)			
작 동 신 호	설 정 치	동시성	비고
증기발생기 저-압력	62kg/cm ² a(885psia)	2/4	
증기발생기 고-수위	93%	2/4	NR
격납용기 고-압력	133cmH ₂ O	2/4	
수 동	수동 스위치	2/4	
	원격정지패널(RSP)	2/4	

<표 4-6> 격납용기 격리신호

격납용기격리신호(CIAS)			
작 동 신 호	설 정 치	동시성	비고
격납용기 고-압력	133cmH ₂ O	2/4	
가압기 저-압력	124kg/cm ² a	2/4	WR
수 동	수동 스위치	2/4	

<표 4-7> 안전주입신호

안전주입신호(SIAS)			
작 동 신 호	설 정 치	동시성	비고
격납용기 고-압력	133cmH ₂ O	2/4	
가압기 저-압력	124kg/cm ² a	2/4	WR
수 동	수동 스위치	2/4	

<표 4-8> 격납용기 살수신호

격납용기살수신호(CSAS)			
작 동 신 호	설 정 치	동시성	비고
격납용기 고-고 압력	1,424cmH ₂ O	2/4	
수 동	수동 스위치	2/4	

<표 4-9> 보조급수 동작신호

보조급수 동작신호(AFAS)			
작 동 신 호	설 정 치	동시성	비고
증기발생기 저-수위	23.5%	2/4	WR
수 동	수동 스위치	2/4	

<표 4-10> 재순환 동작신호

재순환 동작신호(RAS)			
작 동 신 호	설 정 치	동시성	비고
재장전수탱크 저-수위	7.6%	2/4	
수 동	수동 스위치	2/4	

7. 발전소 상태 구분(ANSI N18.2)

가. CONDITION I (정상운전 및 운전과도 상태)

(1) 정상운전, 연료교체 및 보수기간 동안에 빈번하게 발생하거나, 규칙적으로 발생할 수 있는 사건들로 구성된다.

(2) 유형

- 정상운전
- 발전소 가열 및 냉각운전
- 단계적(Step) 출력변화
- 비율적(Ramp) 출력변화
- 허용범위 내에서의 부하상실 : 전출력의 95% 이하

나. CONDITION II (비교적 자주 발생하는 경미한 사건)

(1) 원자로가 정지됨으로써 사고를 충분히 수습할 수 있는 정도의 사건(발생을 1회/1년)

(2) 유 형

- 미임계상태 또는 저출력상태에서 제어불능의 제어봉 인출사고
- 제어불능의 붕소희석 사고
- 원자로냉각재 강제유량의 부분적 상실
- 외부 부하상실

- 발전기 보조기기에 대한 외부전원상실
- 원자로냉각재계통의 우발적인 감압

다. CONDITION III

(1) 약간의 핵연료봉의 손상을 초래할 수도 있는 사건들로서 공학적안전설비계통의 동작으로 충분히 사고를 수습할 수 있는 정도의 사건(발생율 : 1회/수명)

(2) 유 형

- 원자로냉각재계통의 가장 큰 배관에서 발생한 약간의 파열이나 파열된 곳으로부터 냉각재의 누설이 발생하여 비상노심냉각계통을 동작시킬 수 있는 사고
- 소량의 2차측 배관파열사고(주증기관 또는 주급수관)
- 연료가 부적당한 위치로 잘못 장전된 사고
- 원자로냉각재의 강제유량 완전상실
- 기체폐기물 저장탱크의 파열
- 전출력상태에서 1개의 제어봉 인출사고

라. CONDITION IV

(1) 발전소 수명기간 동안에 일어날 수 없는 가상사고로서 사고들의 결과는 막대한 양의 방사성물질을 방출할 수 있는 잠재력을 가지고 있는 사고

(2) 유 형

- 원자로냉각재계통의 주 배관이 양단파열되는 사고(Double-Ended Pipe Rupture)
- 다량의 2차계통 배관파열
- 증기발생기 튜브파열(SGTR)
- 1대의 원자로냉각재펌프 회전자 고착
- 핵연료취급사고
- 제어봉구동장치 보호관 파열사고

8. 원전 사고·고장 등급(INES)

원자력발전소 내·외부에 대한 영향 및 다중 안전계통의 손상정도에 따라 분류한다. 3등급 이하의 경우는 고장으로 분류되며 주로 발전소 내·외부 피해를 사전에 예방할 수 있도록 설계되어 있는 다중안전계통의 손상정도에 따라 등급이 분류된다. 4등급 이상은 핵연료가 손상되거나 방사성물질이 외부로 누출되는 경우로서 사고로 분류된다.

원자력교육원

<표 4-11> 국제원자력 사건등급분류 기준

분류	등급	등 급 분 류 기 준	예
사 고	7	<ul style="list-style-type: none"> 원자로심 내 방사성물질이 다량(수십만 큐리 이상)으로 누출되는 사고 한 국가 이상의 광범위한 지역에 방사선 영향이 미칠수 있는 방사성물질 누출사고 	구 소련 체르노빌 원전사고 ('86)
	6	<ul style="list-style-type: none"> 수만 내지 수십만 큐리 정도의 방사성물질이 외부로 누출되는 사고 	
	5	<ul style="list-style-type: none"> 수천 내지 수만 큐리 정도의 방사성물질이 외부로 누출되는 사고 원자로심의 심한 손상사고(수 % 이상의 노심용융사고) 	미국 TMI 원전 사고 ('79)
	4	<ul style="list-style-type: none"> 인근주민이 연간 허용제한치(500mRem) 정도의 방사선을 받을 수 있는 방사성물질 누출사고 원자로심의 일부가 손상되는 사고 발전소종사자가 치사량(50만mRem 정도)의 방사선을 받는 사고 	
고 장	3	<ul style="list-style-type: none"> 인근주민이 연간 허용제한치의 10% 정도의 방사선을 받을 수 있는 방사성물질 누출사건 사고로 확대될 가능성이 있는 안전계통의 심각한 기능상실 발전소종사자가 급성 방사선장해(10만mRem 정도 피폭)를 받는 사건 	스페인 반델로스 원전 화재 ('89)
	2	<ul style="list-style-type: none"> 안전계통의 중요한 고장이 발생하였으나 심층방어 안전기능이 유지되어 사고로 확대될 가능성이 없는 경우, 또는 발전소종사자가 연간 허용제한치(5000mRem) 이상의 방사선을 받는 사건 	일본 미하마원전 증기발생기 관누설 사건 ('91)
	1	<ul style="list-style-type: none"> 원자로시설의 안전성에 영향을 미치지 않는 비정상상태 기기고장 등으로 발전소 안전계통상태가 운전제한조건을 벗어난 경우 	
경미한 고장	0	<ul style="list-style-type: none"> 원자로시설의 안전성에 전혀 영향이 없는 경미한 고장(정상운전의 일부로 간주) 	

※ INES(International Nuclear Event Scale) : 국제원자력 사건분류 기준

[핵심요약]

공학적안전설비의 기능은 핵연료피복재 보호, 격납용기건전성 확보, 경납용기내 방사성 물질 제거, 주제어실 건전성 확보, 냉각재 재고량 확보 및 자연순환 및 1차측 냉각이다.

공학적안전설비의 설계특성은 다중성, 독립성, 안전성, 다양성 및 시험성이고, 목표는 연료 및 피복재, 원자로냉각재계통 압력경계와 격납용기를 보호하는 것이다

공학적안전설비는 격납용기계통, 격납용기살수계통, 비상노심냉각계통, 보조급수 계통 그리고 핵분열생성물 제거 및 제어계통으로 구성되어 있다.

공학적안전설비 동작신호에는 주증기격리신호, 격납용기격리신호, 안전주입신호, 격납용기살수신호, 보조급수동작신호와 재순환동작신호가 있으며, 발전소 상태는 CONDITION I, II, III, IV가 있고, 원전 사고/고장 등급은 8등급으로 되어 있다.

원자력교육원

제2절 격납용기계통

[학습목표]

1. 격납용기계통의 목적과 설계기준을 이해하고 설명할 수 있다.
2. 격납용기계통의 목적과 설계특성을 이해하고 설명할 수 있다.
3. 격납용기의 형상을 이해하고 설명할 수 있다.
4. 격납용기계통 관련 부속계통들을 이해하고 설명할 수 있다.

1. 개 요

격납용기계통은 격납용기 건물, 격납용기 열제거계통(CHRS), 격납용기 공기정화 및 청정계통, 격납용기격리계통, 격납용기 가연성 기체제어 계통으로 이루어지며, 이 계통의 설계기준사고(DBA)는 냉각재상실사고(LOCA)와 주증기관파열사고(MSLB) 등과 같은 최악의 가상사고이다.

2. 설계 기준

가. 격납용기 건물 설계기준

격납용기의 안전설계 기준요건은 사고로 인한 방사능물질 누출 시 10CFR100에 규정된 제한치를 초과하지 않는 것이다. 즉, 격납용기는 설계기준사고시의 온도, 압력에 견디며, 사고발생 후 처음 24시간 동안의 설계 누설량은 격납용기 공기체적의 0.2%, 24시간 이후에는 0.1%를 초과하지 않도록 설계되었다.

격납용기 건물과 내부구조물의 첨두치(Peak) 압력 분석 시에 고려된 가정은 각 사고의 소외전원상실과 공학적안전설비(ESF)의 최대 효과를 갖는 단일기기의 능동적 기능상실이 동시에 발생하는 것으로 간주하고, 2차측 계통의 배관파열시에는 소외전원이 이용 가능한 것으로 보며, 또한 2가지의 사고가 동시에 또는 연속적으로 발생하지는 않는다고 가정하였다. 이상의 가정을 적용한 첨두압력은 설계압력과 사이에 10% 이상의 설계 여유도를 가진다. 가상사고 발생시 격납용기 내부 열에너지는 격납용기

팬 냉각기와 살수계통에 의해 제거되며, 살수된 물은 격납용기 바닥에 설치된 격납용기 재순환 집수조로 모아진다. 공학적안전설비는 독립된 2개의 계열로 구성되고, 각각의 2개의 팬냉각기와 하나의 살수계열로 구성되며, 살수계통이 집수조로 부터 흡입하는 경우 정지냉각열교환기는 살수에 공급되는 집수조 물을 냉각하는데 사용된다. 격납용기열제거계통은 최대효과를 갖는 단일기기의 능동적 기능상실에도 최소한의 열제거용량을 갖도록 설계되어, 이런 경우에 나머지 공학적안전설비계통이 침투압력을 감소시키고 가상사고 후 24시간 이내에 격납용기 침투압력의 50% 이하로 줄일 수 있다.

나. 격납용기 내부구조물 설계기준

내부구조물들은 가상 배관파열의 침투압력과 체트류 충격을 견디도록 설계되며 설계제한치 이내로 차압을 유지시키기 위해 각 칸(Chamber)마다 환기가 제공된다. 또한 냉각재 배관 구속장치(Restraint), 원자로용기, 증기발생기 등은 배관 휨(Whip)이나 기기 지지물을 통해 전달된 힘이 내부 구조물이나 격납용기 구조물의 건전성을 저해하지 않도록 설계 되었다. 내부구조물의 예상 최고압력과 설계압력 간에는 40% 이상의 설계여유도를 갖도록 하였고 내부 구조물 구성은 다음과 같다.

- (1) 원자로 지지물
- (2) 증기발생기 지지물
- (3) 냉각재펌프 지지물
- (4) 가압기 지지물
- (5) 1차 차폐벽 및 원자로 수조(Cavity)
- (6) 2차 차폐벽
- (7) 재장전 수조
- (8) 운전 및 중간바닥(Operating & Intermediate Floors)
- (9) 콘크리트 충전판(Interior Concrete Fill Slab)
- (10) 원자로 비산물 차폐판(Reactor Missile Shield)
- (11) 천정 크레인 지지물(Polar Crane Supports)

3. 설계 특성

격납용기건물, 내부구조물, 공학적안전설비 등은 가상사고시의 동적 영향으로 인해 안전기능이 상실되지 않도록 보호되며 격납용기 설계는 사고 시 발생하는 비산물, 배관 휨(Whip), 제트충격력(Jet Impingement Force)으로부터 중요한 구조물, 계통 및 기기 등을 보호하는데 필요시에는 방벽과 구속장치(Restraint)를 이용한다. 격납용기는 집수조로의 물 회수를 방해하는 안전주입 및 격납용기 살수의 트래핑(Trapping)을 최소화 하도록 설계되어, 원자로 수조(Reactor Cavity)와 노내 중성자속 감시설비 수조(Cavity)만이 일부 물을 트래핑 한다. 냉각재계통, 안전주입탱크, 재장전수 탱크로부터의 총 가용물의 양은 최소한 약 719,000gal(2,718m³)이며, 이중 약 19%의 물이 재순환에 사용되지 못한다. 정상운전 중 재장전 수조 바닥에 있는 배수구(Drain Hole)는 살수된 물이 격납용기 바닥 집수조로 원활히 모일 수 있도록 개방해둔다. 정상운전 중 격납용기 대기는 격납용기 냉각 및 환기계통의 연속운전에 의해 120°F 이하로 유지되며, 이를 위해 4대중 2대의 격납용기 팬냉각기가 사용되며 나머지 2대는 대기상태를 유지한다.

4. 격납 용기 형상

가. 격납용기 구조물

격납용기 구조물은 설계압력에 의해 발생하는 내부 압력을 효과적으로 감소시킴으로서 구조물의 안정성과 경제성을 높일 수 있는 포스트 텐서닝 공법을 도입하여 설계하였다.

(1) 포스트 텐서닝(Post Tensioning)공법

구조물에 구조물 자중 이외의 하중을 미리 가하여 철근 콘크리트 구조물 설계 시 일정한 사용 하중 강도에 의해 발생하는 모든 하중에 저항하고 특히 인장측에서의 균열 발생 억제효과를 획득하고자 고안된 공법 즉, 철근 콘크리트 구조물에 콘크리트를 타설하기 전에 관을 부설한 후 콘크리트를 타설하여 전체 구조물을 완성한 후 관속에 텐던(Tendon)을 넣고 긴장단에서 잭(Jack)으로 긴장재를 긴장시켜 구조물에 압축응력을 도입시키는 방식이다.

포스트 텐서닝 방식은 본드(Bonded) 텐덤 방식과 비본드(Unbonded) 텐덤 방식으로 분류되는데 본드(Bonded) 텐덤 방식은 구조물과 긴장재가 일체가 되도록 하는 방식이며 비본드(Unbonded) 텐덤 방식은 구조물과 긴장재가 분리되어 추후 검사 및 재 긴장이 용이하도록 설계한 방식이다. 영광3, 4호기 및 울진3, 4호기는 비본드(Unbonded) 텐덤 방식을 채택하고 있다.

(가) 텐던(Tendon)의 구성

1개의 긴장재는 7가닥의 선(Wire)을 꼬아 이루어진 스트랜드(Strand)가 55가닥이 모여 형성된 스트랜드 다발이다.

(나) 텐던의 설치 위치

- 1) 수직 긴장재(총 96개) : 역 U자형으로 격납건물의 바닥기초(Foundation Slab) 아래에 있는 텐던 갤러리(Gallery)에서 시작되어 돔(Dome) 정점을 지나 반대편 격납건물의 바닥기초(Foundation Slab)아래에 있는 텐던 갤러리에 정착된다.
- 2) 수평 긴장재(총 165개) : 격납건물에 120°간격으로 설치되어 있는 3개의 부벽(Buttress)중에서 하나씩 걸어서 부벽 양단에 정착시켜 1개의 텐던이 240°씩 돌아가도록 설치된다.

(2) 격납용기 치수

- (가) 바닥기초 두께 : 3.7m
- (나) 바닥기초 직경 : 48.8m
- (다) 격납용기 내경 : 43.9m(144ft)
- (라) 격납용기 내부높이 : 65.8m(216ft)
- (마) 격납용기 벽두께 : 1.2m(4ft)
- (바) 돔(Dome) 두께 : 1.1m

나. 바닥 기초(Foundation Base Slab)

평평한 원형 바닥기초는 중앙의 캐비티와 계측용 터널을 가지며 강화 콘크리트로 제작되고 출입통로(Continuous Access Gallery)는 수직 역 U자형 강철줄로의 출입을 위해 바닥기초 아래에 위치한다. 바닥기초 상부에는 밀봉막을 형성키 위해 철판을

라이닝 하였다.

다. 격납용기 벽

원통형 격납용기벽은 바닥기초의 상부로부터 4inch의 일정한 두께로 되며, 장비 출입구(Equipment Hatch), 인원 출입구(Personnel Access), 종사자 비상출구(Personnel Emergency Exit Hatch) 등의 주변에는 두께가 보강된다. 격납용기 강화는 주로 원주형(Hoop)과 수직형(Meridional) 철강으로 구성되며, 미리 인장응력이 가해진 강철줄도 역시 이와 같은 방향으로 배열된다. 격납용기 내부로의 출입은 2개의 작업용 출입구를 통하여, 하나는 정상 출입용이고, 다른 하나는 비상용 출구이다. 장비 출입구는 장비의 격납용기 반입, 반출을 가능케한다.

이밖에 격납용기벽에 설치된 주요 관통부는 주중기, 급수, 공기조화계통 배관 등에 필요한 것들이며 여러가지 프로세스 배관, 전기선 관통부, 핵연료 이송관 등이 관통한다. 관통슬리브(Sleeve)는 강재이며 콘크리트에 고정되고, 라이닝 철판에 용접되어 밀봉된다. 천정 크레인 대들보를 지지하기 위한 크레인 받침은 격납용기 주변에 균등하게 격납용기벽내에 끼워진다. 크레인 받침 부하로 인해 벽에 작용하는 힘은 벽에 추가로 보강을 하여 대응하며, 여기에는 두꺼운 라이닝 철판이 삽입된다.

라. 격납용기 돔

격납용기 건물의 지붕은 반구형 돔으로서, 내부는 밀봉을 위해 철판 라이닝을 하고 원주형으로 돔에 강철줄을 보강하기 위해 돔까지 버팀벽(Buttress)이 연장된다.

5. 관련 부속계통

가. 격납용기 열제거계통

격납건물살수계통은 유일한 격납건물 능동 열제거계통이다. 격납건물살수계통은 사고시 격납건물 대기로부터 요오드 및 기타 방사성 물질을 제거하고, 가연성 기체의 국부적 집적을 방지하기 위해 격납건물 대기를 혼합시키며, 사고후 격납건물의 열 에너지를 제거함으로써 온도와 압력을 감소시키는 기능을 한다.

나. 격납용기격리계통

격납용기 내부에서 방사능물질을 방출하는 가상사고 발생시에 외부와 격납용기 대기를 격리하기 위한 계통이며 격리는 사고시에 사용되지 않는 격납용기 관통배관을 격납용기 격리 동작신호(CIAS)에 의해 차단함으로써 대기로의 제어되지 않은 방사능 누출을 방지한다.

다. 가연성 가스 제어계통

가상 설계기준사고시에 격납용기 대기 중으로 물의 방사화, 격납용기 살수에 의한 격납용기내부 재질부식, 피복재의 지르코늄과 물의 반응에 의한 수소가 발생될 수 있는데 이는 4%의 폭발농도 제한치 내로 제한하기 위한 계통이다.

라. 격납용기 공기정화 및 청정계통

정상운전중에는 저체적 퍼지계통으로 격납용기를 퍼지하고, 재장전 작업중에는 고체적의 퍼지 및 배기율이 적용된다.

6. 격납용기 차이점

<표 4-12> 격납용기 차이점

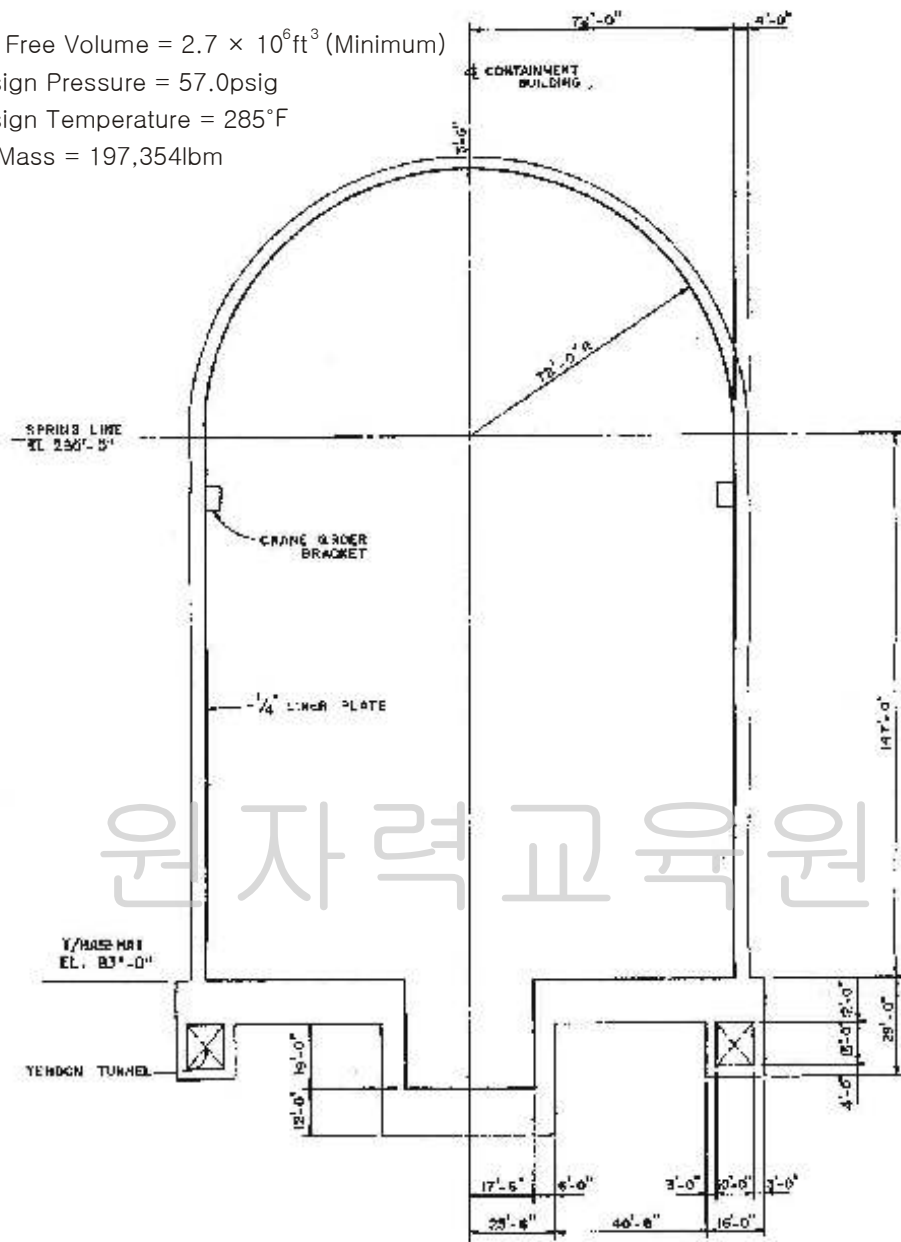
항 목	영광 3, 4	울진 3, 4	차 이 점 / 비 고
내부 직경(m)	43.89(144ft)	43.89(144ft)	*격납용기 설계압력 사고분석 1.영광3,4 : RCFC가 안전등급 으로 사고시 운전됨을 가정 2.울진3,4 : RCFC가 비안전등 급으로 사고시 운전되지 않 음을 가정 RCFC : Reactor Containment Fan Cooler
외벽 두께(m)	1.22(4ft)	1.22(4ft)	
돔 반경(m)	21.9(72ft)	21.9(72ft)	
내측 높이(m) (기초 slab 기준)	65.84(216ft)	65.84(216ft)	
설계압력(psig)	54	57	
Free Volume(ft ³)	2.7277×10 ⁶ ft ³	2.7277×10 ⁶ ft ³	

Net Free Volume = $2.7 \times 10^6 \text{ft}^3$ (Minimum)

Design Pressure = 57.0psig

Design Temperature = 285°F

Air Mass = 197,354lbm



[그림 4-33 격납용기 건물 단면도

[핵심요약]

격납용기계통은 격납용기 건물, 격납용기 열제거계통, 격납용기 공기정화 및 청정계통, 격납용기격리계통, 격납용기 가연성 기체제어 계통으로 이루어지며, 이 계통의 설계기준사고(DBA)는 냉각재상실사고(LOCA)와 주증기관파열사고(MSLB) 등과 같은 최악의 가상사고이다.

설계기준에는 격납용기 건물 설계기준과 격납용기 내부 구조물 설계기준이 있다.

그리고 인장응력에 취약한 특성을 갖는 철근콘크리트를 보완하기 위해 미리 압축응력을 가해 놓는 포스트 텐션닝 공법이 도입되어 있다.

원자력교육원

제3절 안전주입계통

[학습목표]

1. 안전주입계통의 목적, 설계기준을 이해하고 설명할 수 있다.
2. 안전주입계통의 주요 구성기기를 이해하고 설명할 수 있다.
3. 안전주입계통 이해하고 설명할 수 있다.

1. 개 요

안전주입계통은 원자로냉각재상실사고와 같은 예상치 않은 사고가 발생할 때 노심 냉각에 필요한 비상냉각수를 공급하는 계통으로 비상냉각수에는 붕소가 함유되어 있다. 사고시 노심으로 비상냉각수를 지속적으로 공급하는 것은 원자로가 정지된 후 계속하여 발생하는 잔열을 제거하기 위함이며, 또한 비상냉각수내 붕소를 함유하는 것은 원자로 정지 후에도 방출되는 중성자를 흡수하여 원자로를 미임계상태로 계속 유지하기 위한 것이다.

공학적인 안전설비의 핵심부를 이루는 안전주입계통은 원자로냉각재상실사고, 이차측 급수 또는 증기상실 등과 같은 설계기준사고가 발생하면 계통으로부터 여러 가지 계측신호들을 받아 안전주입신호를 자동적으로 발생시켜 원자로냉각재계통으로 붕소가 포함된 비상냉각수를 공급한다. 또 계측신호에 의한 자동동작 외에 필요시 운전원이 수동으로 계통을 작동시켜 노심냉각 및 안전정지를 시킬 수 있다.

안전주입계통은 증기관 파열사고나 제어봉집합체의 인출사고와 같은 예상치 않은 사고에도 작동하여 사고를 완화시킬 수 있다. 안전주입계통은 계통압력에 따라 고압 안전주입계통과 저압 안전주입계통이 있고 펌프동력 사용유무에 따라 능동형과 피동형 안전주입으로 구분할 수 있다. 피동형 안전주입은 탱크의 압력을 이용하여 원자로 냉각재계통 압력이 안전주입탱크의 압력이하로 떨어질 때 외부의 동력을 이용하지 않고 탱크압력만으로 안전주입을 수행하는 설비이다.

고압 및 저압 안전주입계통은 안전주입작동신호(Safety Injection Actuation Signal)가 발생하면 동시에 자동으로 동작하고 동작초기 이들 계통은 붕산수원을 재장전수탱

크(RWT)로 부터 취하는데 재장전수탱크의 수위가 감소하여 탱크 저수위에 도달되면 재순환작동신호(RAS)가 발생된다. 이때부터 재장전수탱크에서 흡입하던 안전주입계통은 탱크로부터 오는 유로는 자동 차단되고, 격납용기 바닥에 설치된 집수조로부터 밸브가 개방되어 집수조에 모인 비상냉각수를 취하여 장기간(재순환 기간) 냉각수를 계속 공급할 수 있다.

피동형 안전주입형인 안전주입탱크는 원자로냉각재계통의 저온관(4개)에 연결되어 있는데 냉각재계통 압력이 안전주입탱크 압력 이하로 감소하면 탱크 내의 붕산수가 냉각재-탱크간의 압력차이에 의해 자동으로 주입된다. 압력수두를 제공하기 위하여 정상시 안전주입탱크는 질소가압계통을 이용하여 약 $42\sim44\text{kg/cm}^2(600\sim625\text{psig})$ 의 압력으로 가압되어 있다.

안전주입신호의 발생은 4개의 독립적인 가압기 압력감지기와 4개의 독립적인 격납용기 압력감지기의 입력신호로부터 시작된다. 압력신호의 4개 감지기 중 2개 감지기가 상에서 설정치에 도달하면 자동으로 안전주입계통이 기동된다.

※ 안전주입신호

- 가압기 저압력 : $123.9\text{kg/cm}^2(1,762\text{psia})$, 2/4
- 격납용기 고압력 : $0.13\text{kg/cm}^2(1.9\text{psia})$, 2/4
- 수동

발전소 기동이나 정지기간 중 가압기의 저압력에 의한 안전주입신호는 가변 설정치로서 운전압력에 따라 가압기 저압력 안전주입신호 설정치가 조절된다.

안전주입계통은 4개의 주요 부속계통으로 구성된다.

- 고압안전주입계통(High Head Safety Injection)
- 안전주입탱크(Safety Injection Tank)
- 저압안전주입계통(Low Head Safety Injection)
- 장기재순환계통(Long Term Recirculation)

2. 설계기준

가. 기능적 설계기준

원자로냉각재계통 내에 비상냉각수를 공급하는 안전주입계통은 발전소 안전성분석의 기준이 되는 설계기준사고와 같은 사고 발생시에도 원자로를 충분히 냉각하고 미임계 상태로 안전하게 유지할 수 있도록 하기 위하여 각 설비들은 아래와 같은 설계요건을 갖추고 있어야 한다.

- (1) 고압안전주입 펌프와 저압안전주입 펌프는 충분한 압력과 유량으로 원자로냉각재계통에 공급할 수 있어야 한다.
- (2) 원자로를 냉각할 비상냉각수는 원자로 정지 후 나오는 잔열을 제거할 수 있는 충분한 양이 확보되어 있어야 하며, 또한 원자로를 미임계로 유지할 만큼 충분한 붕소농도를 유지하여야 한다.
- (3) 안전주입계통은 배관의 파단 위치에 상관없이 각각의 주입 부분에 거의 균등한 유량을 주입할 수 있도록 설계되어야 한다.

※ 설계기준 사고

- 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident)
- 제어봉 이탈사고(Rod Assembly Ejection Accident)
- 2차 냉각재 상실사고(Loss of Secondary Coolant, Main Steam and Feedwater)
- 증기관 파열사고(Steam Generator Tube Rupture Accident)

나. 공학적 설계기준

안전주입계통은 기능적인 설계 이외에 계통의 신뢰성을 확보하기 위하여 공학적으로 그 안전기능을 충분히 발휘할 수 있도록 적절한 설계기준을 가지고 있어야 한다.

- (1) 한 개의 능동적 기기고장(Active Single Failure)이 발생하거나 또는 한 계열에서 고장이 발생하여도 충분한 비상냉각수를 공급할 수 있도록 안전주입계통은 2계열로 구성되어 있으며 다중성을 갖도록 설계되어 있다. 이들 기기에 공급되는 전원도 관련기기 및 계열에 따라 분리된 모선에서 각

각 전원을 공급받도록 설계되어 있다.

- (2) 냉각재상실사고와 같은 사고발생시 장기간 작동되어야 하는 안전주입계통의 기기와 계측기는 온도, 방사선, 습도 및 화학적인 악조건의 환경에서도 충분한 성능을 발휘할 수 있도록 설계되어야 한다.
- (3) 지진에도 견딜 수 있도록 내진범주 I 급의 요건에 따라 설계되어 있다.
- (4) 그 외 폭풍, 해일 및 외부 비산물로부터 보호되며 미국연방법 10CFR 50.46의 설계기준을 만족할 수 있도록 설계하였다.

※ 10CFR 50.46 Criteria

- 핵연료 피복재의 최대온도는 1204℃ 이하로 제한하는데 이는 물과 피복재간의 반응을 억제한다.
- 핵연료 피복재의 산화율은 피복재 두께의 17%를 초과하지 않도록 한다. 이는 핵연료 피복재의 취성과괴 가능성을 제한하여 핵연료 건전정을 확보하기 위함이다.
- 핵연료 피복재인 지르코늄(Zr)과 냉각수인 물(H₂O)과의 반응에서 생성되는 총 수소생성량을 1% 이내로 제한한다. 이는 지르코늄-물 반응으로 생성된 수소가 격납용기 내 축적 및 폭발로 격납용기 건전성상실을 방지하기 위함이다.
- 원자로내 내부구조물은 사고기간 냉각이 가능한 기하학적 형태를 유지하여야 한다.
- 계속적인 노심냉각 및 붕괴열을 제거할 수 있도록 설계되어야 한다.

3. 주요 구성기기

가. 재장전수탱크(RWT)

재장전수탱크는 안전주입계통의 1차적 붕산수 공급원이다. 4,000~4,400ppm의 붕산농도를 유지하는 이 탱크는 모든 제어봉이 인출된 상태에서 저온상태의 발전소를 미입계로 유지시킬 수 있도록 설계되어 있다. 화학 및 체적 제어계통의 일부분인 재장전수탱크는 698,000gal의 저장용량을 갖고 있다. 이는 모든 공학적안전설비계통의 설계

용량 운전으로 재순환 작동신호(RAS) 발생시까지 최소한 20분이 소요되는 용량이다.

나. 재순환 집수조

격납용기 내 위치한 재순환집수조는 격납용기 하부 바닥에 설치되어 있으며, 사고시에 계통으로부터 쏟아져 나오는 냉각수를 한 곳으로 모으는 역할을 한다. 안전주입계통 재순환 작동신호(RAS)발생은, 재장전수탱크 물이 거의 다 소모되어 이후부터 집수조에 고인 물을 취하여 비상냉각수로 재사용 함을 의미한다. 집수조의 용량은 해당 공학적안전설비계통의 요구수량을 고려하여 2500gal의 용량을 갖도록 설계하였다. 이 안전주입계통 재순환집수조는 격납용기 바닥으로부터 6feet 위치에 설치되어 있어 원자로를 제외하면 건물 내의 가장 낮은 위치에 있다. 이는 냉각재상실사고(LOCA)가 발생하였을 때 상실된 냉각재가 재순환집수조에 모이도록 하기 위함이다. 그러나 정상 운전 중에 소량의 누설로 생기는 일반 배수는 재순환집수조로 유입되지 못하도록 집수조 입구 주변 바닥을 상대적으로 높게 하였다. 재순환집수조의 입구는 그레이팅(Grating), 트래쉬랙(Trash Rack) 및 그물망으로 보호되어 있는데 이는 사고기간 중에 격납용기 내부에서 생성된 이물질이 유입되어 집수조 재순환 유로관이 막히는 것을 방지하기 위함이다. 그물망은 0.09인치 직경 이상의 이물질이 유입되는 것을 차단할 수 있다.

다. 고압안전주입펌프

고압안전주입펌프는 수평형 8단 원심형 펌프로 비누설 기계식 밀봉(Mechanical Seal) 구조를 갖고 있으며, 안전주입신호 발생시 재장전수탱크(RWT) 또는 재순환집수조로부터 저온·저압의 비상냉각수를 원자로냉각재계통으로 주입하여 노심에 봉산수를 공급한다.

고압안전주입펌프의 전동기는 수평형 유도 전동기이다. 정격부하에서 5초 이내에 정격속도까지 가속할 수 있으며 사고시 즉시, 냉각수를 공급할 수 있도록 설계하였다.

고압안전주입펌프의 용량은 소형냉각재상실사고시에 재순환 작동까지의 최소 요구시간(안전주입신호 발생 후 20분)이 지난 시점에서의 붕괴열을 제거하기에 충분한 용량으로 설계하였다.

라. 저압안전주입펌프

저압안전주입펌프의 전동기는 자체 공기순환냉각계를 갖고 있는 수직형유도 전동기이다. 대형냉각재상실사고시 원자로냉각재계통 압력이 수초 또는 수분 이내 격납용기 대기압력 가까이 떨어질 때 많은 양의 비상냉각수를 노심으로 공급한다. 전동기는 정격전압의 75%에서 5초 이내에 정격속도에 도달하여 정격부하를 감당할 수 있도록 설계되어 있다.

저압안전주입펌프는 주제어실과 원격정지 패널에서 조작이 가능하며 “안전주입 작동신호”(SIAS)에 의해 자동으로 기동된다. 또한 운전원에 의하여 수동으로 기동될 수 있다. 저압안전주입펌프는 “재순환작동신호”(RAS)가 발생하면 자동 정지된다. 이로 부터 펌프를 기동하는 것은 운전원의 판단에 의해서 수동으로 조작된다.

마. 안전주입탱크(Safety Injection Tank)

4개의 수직 원통형 탱크인 안전주입탱크는 각각 냉각재 저온관에 연결되어 있다. 재질은 탄소강이며 표면은 스테인레스강으로 피복되어 있다. 원자로냉각재계통과 분리를 위해 2개의 체크밸브와 1개의 전동기 구동격리 밸브를 갖고 있다. 안전주입탱크는 대형냉각재상실사고시 안전주입펌프에 의한 유량주입에 앞서 신속한 냉각재 주입을 목적으로 설계되었다. 그리하여 안전주입탱크의 모든 설계인자(기체와 봉산수의 혼합비, 기체 압력, 방출관 크기, 봉산농도 등)는 냉각재상실사고시 피복재의 반응이나 용융을 방지하고 노심냉각을 수행하기에 충분하도록 고려하여 설정된 것이다. 안전주입탱크는 4000~4400ppm(2.5 w/o)의 봉산농도를 유지하고 있으며 42~44kg/cm²(600~625psig)의 질소로 가압되어 있고 총 체적은 13,898gal 이다.

4. 계통 설명

가. 고압 안전주입계통

발전소 정상시에는 대기상태(Standby mode)에 있고 8개의 모관격리밸브를 제외한 모든 관련 밸브들은 재장전수탱크로부터 냉각재계통 저온관으로 봉산수를 주입할 수 있도록 배열되어 있다. 고압안전주입펌프들은 전원이 가압된 상태로 항상 운전가능(Operable) 상태로 준비되어 있다.

안전주입작동신호(SIAS)가 발생하면 고압안전주입계통은 자동으로 주입상태(Injection Mode)로 돌입하여 고압안전주입펌프는 자동으로 기동되고, 안전주입 모관 격리밸브 자동 열림, 재장전수탱크로부터 봉산수를 원자로냉각재계통에 주입한다. [그림 4-5]는 안전주입계통 주입모드(Injection Mode)에 있는 고압안전주입계통의 유로 배열을 보여준다.

안전주입작동신호(SIAS)는 “가압기 저압력”, “격납용기 고압력“ 또는 수동에 의해 발생된다. 무유량 운전(Dead Headed Operation)에 의한 펌프의 손상을 막기 위해 최소 유량관이 설치되어 있다. 고압안전주입펌프는 소외전원상실시에도 30초 이내에 비상디젤발전기로부터 전원을 공급받아 정상적 주입기능을 수행할 수 있다. 초기 재장전수탱크로부터 냉각수원을 취하여 운전되는 고압안전주입계통은 재장전수탱크 수위가 약 7.6%에 도달할 때까지 계속 유로를 유지하다가 7.6% 수위에 도달하여 ‘재순환 작동신호(RAS)’가 발생되고 이후 냉각수원을 안전주입계통 재순환수조로부터 취하게 된다. 이때 최소 유량관은 자동으로 닫히게 되는데, 이는 재순환집수조로부터 재장전수탱크로의 역류를 막아 냉각수재고량을 최대한 확보하도록 하기 위한 설계이다. 이제 고압안전주입계통의 운전유로는 단기 재순환 모드 운전중이며, [그림 4-6]은 단기 재순환 모드에 있는 고압안전주입계통의 유로를 보여주고 있다.

나. 저압안전주입계통

저압안전주입계통은 안전주입 및 정지냉각의 두 가지 목적을 가지고 설계된 계통이다. 저압안전주입계통은 냉각재계통 온도가 350°F 이상에서는 대기모드(Stand by mode)에 있게 된다. 즉, 저압안전주입계통은 흡입수원을 재장전수탱크로부터 냉각재계통에 주입할 수 있도록 유로가 배열돼 있어야 하고 펌프는 전원가압과 함께 운전 가능상태를 유지해야 한다.

저압안전주입계통은 안전주입작동신호(SIAS)의 발생과 함께 대기모드에서 주입모드로 자동 변환된다. 주입모드(Injection mode)라 함은 펌프가 운전되고 격리기능을 담당하고 있던 모관격리밸브가 열려 재장전수탱크로부터 원자로냉각재계통으로 봉산수를 주입할 수 있는 유로상태를 말한다. [그림 4-7]는 주입모드에 있는 저압안전주입계통의 유로를 보여주고 있다. 그러나 저압안전주입계통의 주입모드가 반드시 유량의

주입을 의미하는 것은 아니다. 그것은 모든 저압안전주입계통의 밸브가 냉각재계통으로 주입할 수 있도록 배열되었다 하더라도 냉각재 압력이 펌프 정지 수두인 14kg/cm^2 (200psig)까지 떨어지지 않으면 유량주입은 불가능하기 때문이다. 대형냉각재상실사고로 순식간에 냉각재압력이 펌프 정지 수두 이하로 떨어지지 않는다면 저압안전주입계통의 운전 초기유량은 최소 유량관을 통하는 100gpm 정도만 주입된다.

저압안전주입계통은 재순환작동신호(RAS)가 발생할 때까지 계속 주입모드에서 운전된다. 재순환작동신호가 발생되면 저압안전주입펌프는 자동으로 정지되고 최소 재순환 유량관 역시 자동 격리된다. 재순환작동신호 발생과 함께 저압안전주입펌프가 자동 정지되는 것은 다음 두 가지 이유 때문이다. 첫째로, 저압안전주입계통은 더 이상 노심냉각을 위해 필요하지 않다. 이는 재순환 작동과 함께 고압안전주입의 재순환 운전으로 노심을 충분히 냉각할 수 있도록 설계하였기 때문이다.

또 다른 이유는 저압안전주입계통을 정지냉각계통으로 활용하기 위함이다. 조건만 허락한다면 가능한 한 빨리 정지냉각계통을 운전하여 발전소 안전을 확보한다. 그러나 재순환작동신호 후에도 필요하다면 여전히 저압안전주입계통으로써 운전이 가능하다. 운전원은 파단에 따라 정지된 펌프를 재기동 할 수 있다. 이때 주의해야 할 것은 재순환작동신호와 함께 저압안전주입계통이 그 흡입수원을 안전주입계통 재순환 집수조에서 취하고 있다는 점이며, 또한 최소 유량관이 격리되는 것은 격납용기 내의 재순환집수조로부터 제장전수탱크로의 역류를 막아 냉각수재고량을 최대한 확보하기 위한 설계이다.

다. 안전주입탱크 주입

원자로냉각재계통 저온관은 각각 1개의 안전주입탱크가 연결되어 있다. 안전주입탱크는 정상운전 조건에서 $42\sim44\text{kg/cm}^2$ ($600\sim625\text{psig}$)의 질소로 가압되어 있고, 전동기구동격리밸브는 전원이 제거된 채 열려 있다. 이때 안전주입탱크에는 2개의 체크밸브가 있어 원자로냉각재계통의 압력이 높을 때는 탱크로 계통수가 유입되지 않으며 원자로냉각재 압력이 탱크 내 압력보다 낮아지면 고농도의 붕산수가 방출될 수 있도록 설계되어 있다. 또한 모든 배기, 배수밸브 및 질소 공급밸브는 닫힘 상태에 있다.

안전주입작동신호가 발생하면 안전주입탱크 격리밸브는 이미 열림 상태에 있다

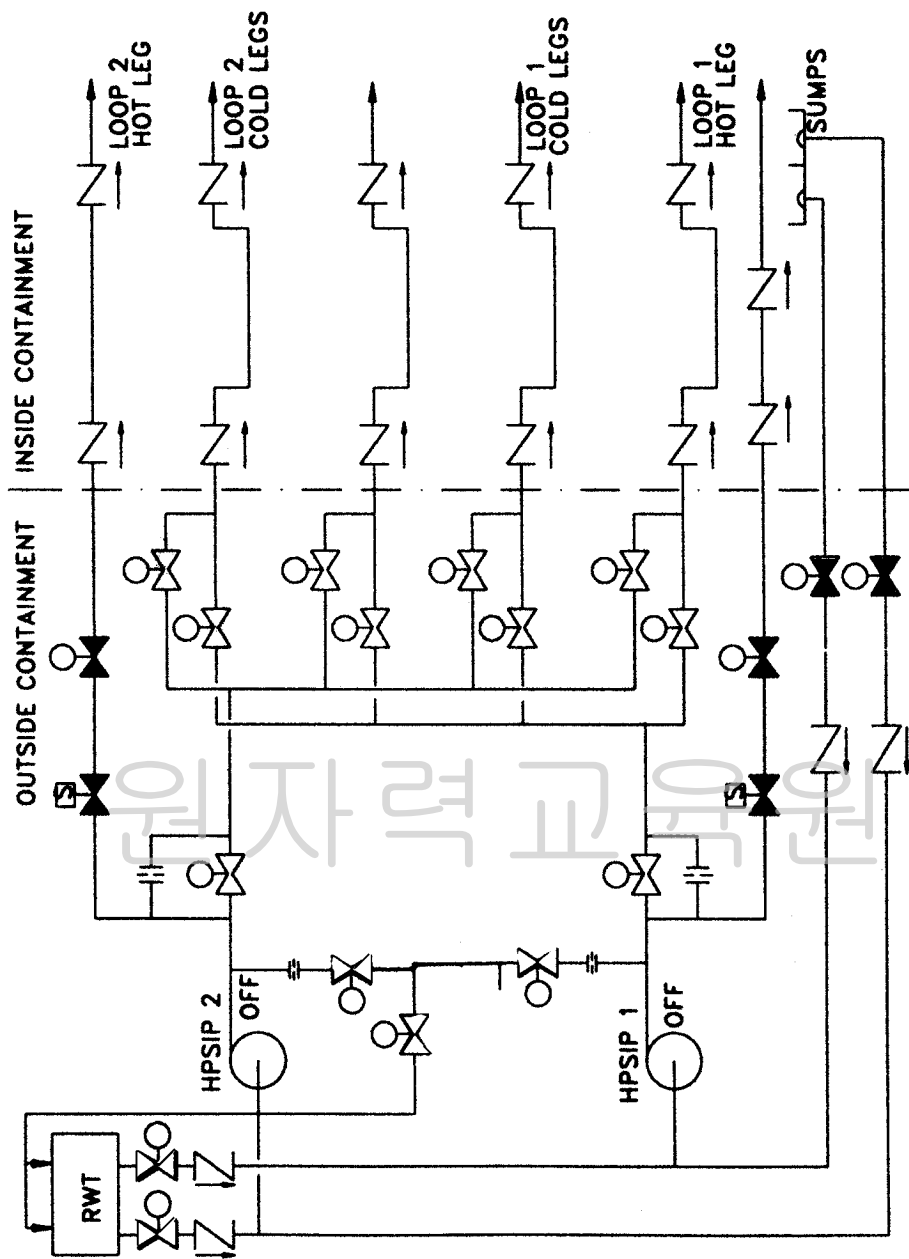
하더라도 다시 자동 열림 신호를 받게 된다. 이는 안전주입탱크의 주입 기능을 보다 확실하게 수행하도록 하기 위한 것이다.

또한 안전주입작동신호(SIAS)가 발생하면 안전주입탱크의 배수밸브는 자동으로 닫힌다. 만약 냉각재상실사고로 인한 냉각재 압력강하가 매우 커서 냉각재 압력이 안전주입탱크 압력 이하로 떨어지게 되면 지금까지 격리기능을 하고 있던 체크밸브가 열려 탱크 내의 봉산수를 저온관으로 주입하게 된다. 안전주입탱크는 정상운전 중 질소공급계통으로부터 질소를 공급받아 가압상태로 유지된다. 발전소 냉각운전 중 탱크 감압을 위해서는 탱크 내의 질소를 대기로 배기하여 감압운전을 수행한다.

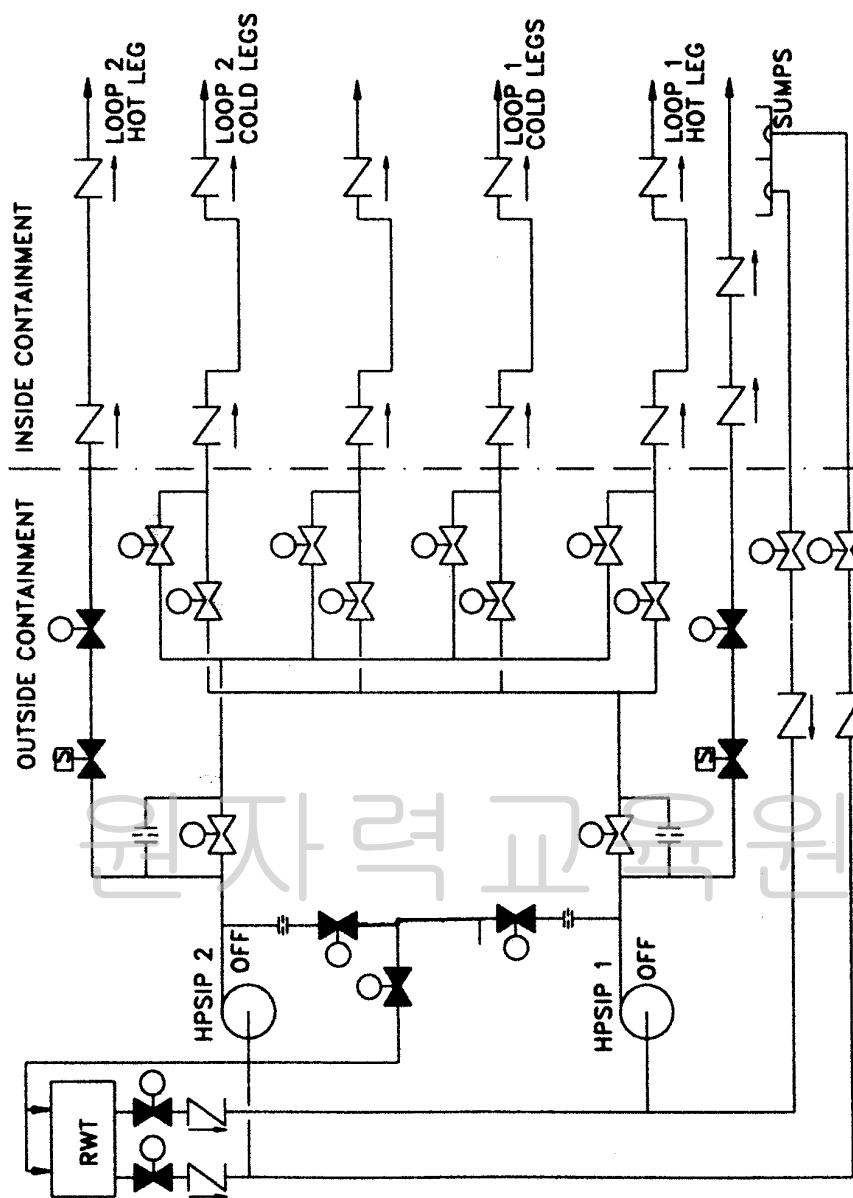
라. 장기 재순환 운전

장기재순환계통의 작동과정을 보면 먼저 냉각재상실사고시 원자로냉각재계통의 압력은 급격히 감소하고 이에 따른 안전주입신호가 발생한다. 이후 재장전수탱크에서 비상냉각수가 공급될 것이며 파단면의 크기, LOCA 후 시간 및 LOCA가 진행될 동안 격리 가능성 여부에 따라 재장전수탱크의 수위의 감소율이 결정이 될 것이다.

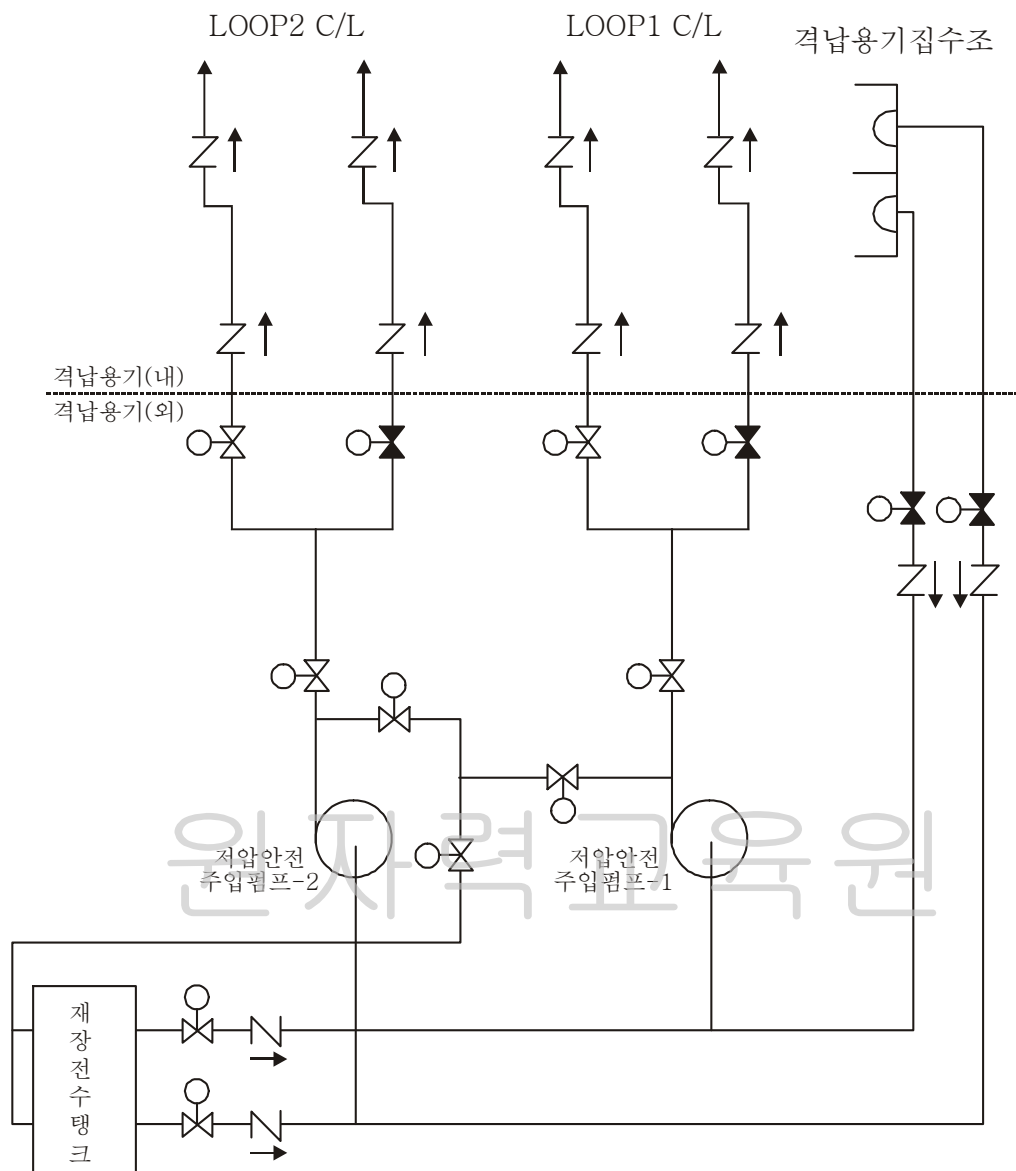
계속되는 비상냉각수의 주입은 결국 4개의 재장전수탱크의 수위 감지기로부터 탱크 저수위 신호를 발생시키거나, 또는 주제어실 운전원의 수동작동에 의하여 재순환 운전이 시작된다. 재장전수탱크의 수위가 7.6%에 도달하면 재순환작동신호가 발생한다. 일단 재순환작동신호(RAS)가 발생되면 격납건물 재순환집수조의 격리밸브가 개방되고, 이로부터 냉각수원을 취하는 고압안전주입펌프는 비상냉각수를 노심으로 계속하여 공급할 수 있다.



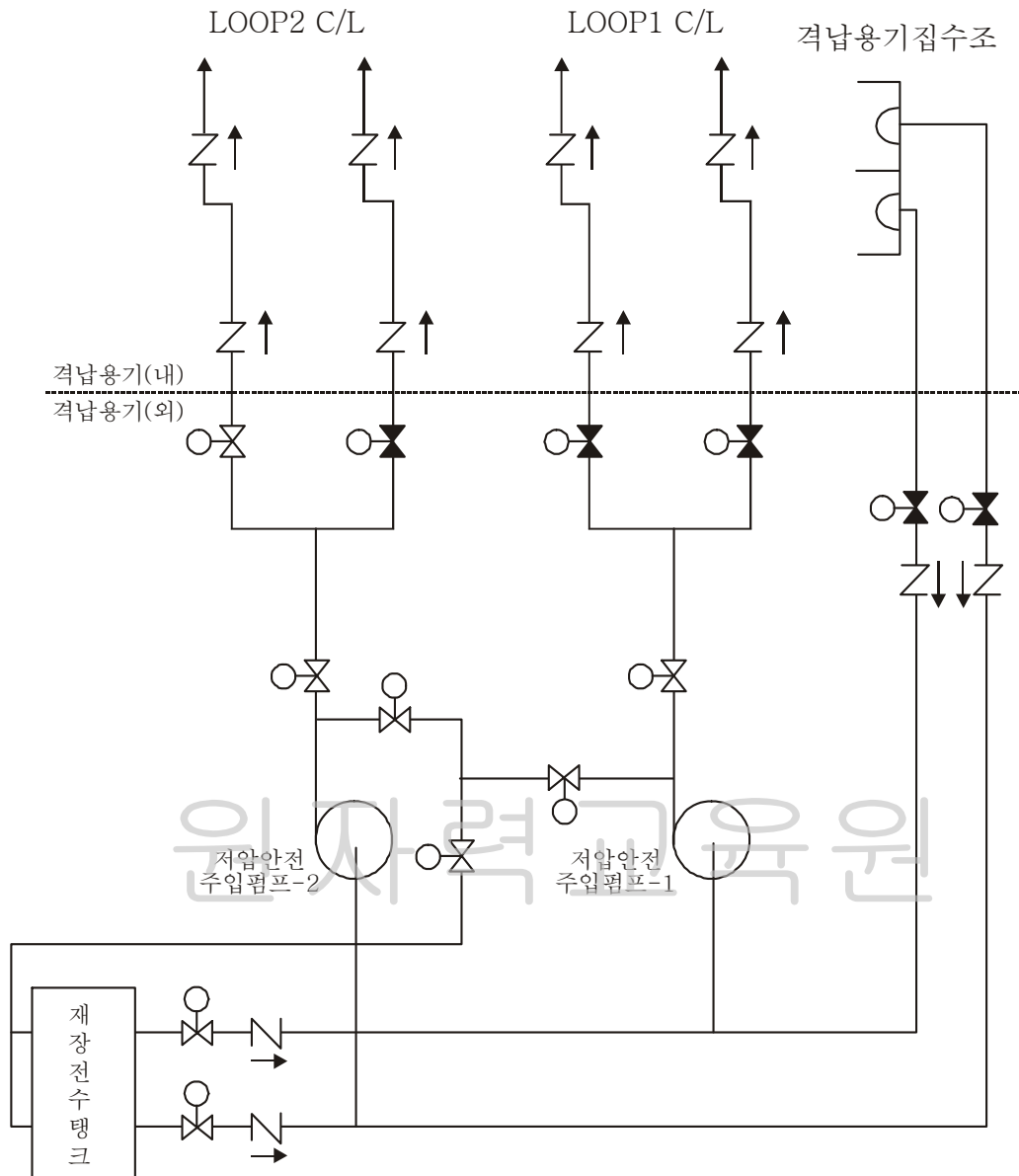
[그림 4-35] 고압안전주입계통(주입운전)



[그림 4-36] 고압안전주입계통(단기재순환)



[그림 4-37] 저압안전주입계통(주입운전)



[그림 4-38] 저압안전주입계통(대기상태)

[핵심요약]

안전주입계통은 원자로냉각재상실사고와 같은 예상치 않은 사고가 발생할 때 노심냉각에 필요한 비상냉각수를 공급하는 계통으로 비상냉각수에는 붕소가 함유되어 있다. 사고 시 노심으로 비상냉각수를 지속적으로 공급하는 것은 원자로가 정지된 후 계속하여 발생하는 잔열을 제거하기 위함이며, 또한 비상냉각수내 붕소를 함유하는 것은 원자로 정지 후에도 방출되는 중성자를 흡수하여 원자로를 미임계 상태로 계속 유지하기 위한 것이다.

안전주입계통은 계통압력에 따라 고압 안전주입계통과 저압 안전주입계통이 있고 펌프동력 사용유무에 따라 능동형과 피동형 안전주입으로 구분할 수 있다. 피동형 안전주입은 탱크의 압력을 이용하여 원자로냉각재계통 압력이 안전주입 탱크의 압력이하로 떨어질 때 외부의 동력을 이용하지 않고 탱크압력만으로 안전주입을 수행하는 설비이다.

고압 및 저압 안전주입계통은 안전주입작동신호가 발생하면 동시에 자동으로 동작하고 동작초기 이들 계통은 봉산수원을 재장전수탱크로부터 취하는데 재장전수탱크의 수위가 감소하여 탱크 저수위에 도달되면 재순환작동신호가 발생된다. 이때부터 재장전수탱크에서 흡입하던 안전주입계통은 탱크로부터 오는 유로는 자동 차단되고, 격납용기 바닥에 설치된 집수조로부터 밸브가 개방되어 집수조에 모인 비상냉각수를 취하여 장기간(재순환 기간) 냉각수를 계속 공급할 수 있다.

피동형 안전주입형인 안전주입탱크는 원자로냉각재계통의 저온관(4개)에 연결되어있는데 냉각재계통 압력이 안전주입탱크 압력 이하로 감소하면 탱크 내의 봉산수가 냉각재-탱크간의 압력차이에 의해 자동으로 주입된다.

※ 안전주입신호

- 가압기 저압력 : $123.9\text{kg}/\text{cm}^2(1,762\text{psia})$, 2/4
- 격납용기 고압력 : $0.13\text{kg}/\text{cm}^2(1.9\text{psia})$, 2/4
- 수동

발전소 기동이나 정지기간 중 가압기의 저압력에 의한 안전주입신호는 가변 설정치로서 운전압력에 따라 가압기 저압력 안전주입신호 설정치가 조절된다.

안전주입계통은 4개의 주요 부속계통으로 구성된다.

- 고압안전주입계통(High Head Safety Injection)
- 안전주입탱크(Safety Injection Tank)
- 저압안전주입계통(Low Head Safety Injection)
- 장기재순환계통(Long Term Recirculation)

제4절 정지냉각계통

[학습목표]

1. 정지냉각계통의 기능 및 설계기준을 이해하고 설명할 수 있다.
2. 정지냉각계통의 주요 구성기기를 이해하고 설명할 수 있다.
3. 정지냉각계통의 계통운전을 이해하고 설명할 수 있다.

1. 개 요

원자로는 정지 후에도 노심에 잔열(Residual Heat) 및 붕괴열(Decay Heat)이 존재하여 적당한 냉각수단을 확보하지 않으면 노심의 온도가 상승하여 연료 및 구조물의 건전성을 위협하게 된다. 즉 잔열에 의한 노심 건전성의 손상을 피하기 위해서는 적절한 냉각수단을 강구해야 한다. 이와 같은 노심 잔열제거 수단으로서 설계된 계통이 정지냉각계통(Shutdown Cooling System)이다.

원자로가 정지된 후 초기에는 2차측 주증기우회제어계통(Steam Bypass Control System)을 이용하여 증기발생기에서 잔열을 제거하나 마지막 단계, 즉 원자로냉각재 계통이 350°F(177°C), 410psia(29kg/cm²a) 이하로 냉각되면 정지냉각계통을 운전하여 기냉각수에 의한 잔열제거 운전을 수행한다. 발전소 정지과정에서 잔열을 제거함에 있어 중요한 계통기기의 과도한 열응력을 피하기 위해 운전원은 기술지침서 및 관련 절차서에 명시된 냉각률을 초과하지 않아야 한다.

또한 정지냉각계통은 발전소 기동 중에 가열율을 제어하는 수단과 연료 재장전수 공급 및 회수 수단 등도 제공하고 있다.

정지냉각계통은 증기발생기의 대기방출 기능 및 보조급수계통과 더불어 소형파단 냉각재상실사고 후에 원자로냉각재계통을 냉각시키는데 사용된다. 정지냉각계통은 증기관과 급수관 파단사고, 증기발생기 전열관 파단사고 후와 발전소 기동 시 원자로냉각재펌프가 운전되기 전에 노심으로의 유량을 유지시키기 위하여 사용된다.

2. 기 능

- 가. 정지냉각계통은 원자로가 정지된 후 원자로냉각재계통이 350°F(177℃), 410psia(29kg/cm²a) 이하로 냉각되면 기기냉각수에 의한 잔열제거 운전을 수행하여 연료 재장전 온도까지 냉각시킨다.
- 나. 정지냉각계통은 발전소 사고 후 즉, 주증기관 파열이나 원자로냉각재 파열 사고(LOCA : Loss of Coolant Accident) 후에 다른 열제거 기기들과 연계되어 원자로를 냉각시키고 저온정지 운전이 가능하도록 한다.
- 다. 연료 재장전 기간 중 연료 재장전수를 충수하거나 배수 시 연료재장전수저장탱크와 재장전 수조를 연결시켜 충수 및 배수기능을 수행한다.
- 라. 정지냉각계통 흡입측 방출밸브(Relief Valve)는 원자로냉각재계통의 저온과 압(LTOP : Low Temperature Over-pressurization Protection) 방지 기능을 제공한다.
- 마. 원자로냉각재계통이 감압되어 운전중일 때 화학 및 체적 제어계통과 연계시켜 원자로냉각재 정화기능을 수행한다.

3. 설계기준

- 가. 정상 발전소 냉각 중 또는 설계기준사고 후에 주제어실에서 최소 한 개 트레인의 정지냉각계통을 운전하는 것이 단일 능동고장에 의해 지장을 받지 않아야 한다.
- 나. 정지냉각운전 동안의 단일 능동기기의 고장과, 설계기준사고 후에 장기 운전모드 동안의 단일 능동고장 또는 제한된 누설의 수동고장을 가정하여도 정지냉각계통의 기능요건을 만족하여야 한다.
- 다. 두 대의 저압 안전주입펌프가 사용 불가능할 때 원자로냉각재계통의 온도가 200°F(93.3℃) 이하이면 저압 안전주입펌프는 격납용기 살수펌프로부터 보조를 받도록 설계되어야 한다.

라. 정지냉각계통의 설계압력과 온도는 900psig(63.3kg/cm²), 400°F(204.4℃)이다.

마. 단일고장에 의해 정지냉각계통은 원자로냉각재계통에 의해 과압되지 않는다. 설계압력이 원자로냉각재계통보다 낮은 정지냉각계통의 기기는 연동장치, 밸브의 배열, 방출밸브를 사용하는 과압보호장치가 제공되어야 한다.

바. 정지냉각계통은 원자로냉각재계통의 온도를 다음과 같이 낮추어야 한다.

(1) 두 개 트레인 냉각 : 원자로정지 후 27.5시간 내에 125°F(51.7℃) 도달

(2) 한 개 트레인 냉각 : 원자로정지 후 36시간 내에 210°F(98.9℃) 도달

사. 단기와 장기 부식효과에 의한 계통 성능저하를 배제할 수 있도록 재질이 선정되어야 한다.

아. 정지냉각 열교환기는 평균 125°F(51.7℃)의 재장전수 온도, 95°F(35℃)의 기기냉각수 온도와 평균 2년의 원자로심 연소도를 기준으로 하여 원자로정지 후 27.5시간 동안 붕괴열을 제거하도록 설계되어야 한다.

자. 과압방지

원자로냉각재계통에 의한 정지냉각계통의 과압은 다음과 같은 방법으로 방지된다.

(1) 하나의 전원 또는 밸브의 상실로 인한 어느 한 트레인의 정지냉각계통이라도 원자로냉각재계통에 부적절하게 연결되거나 혹은 원자로냉각재계통의 압력조건이 허용될 때 최소한 한 트레인의 정지냉각계통이라도 운전불능이 되는 것을 방지하기 위해 정지냉각 흡입측 격리밸브(SI-V651, 652, 653, 654, 655, 656)에는 4개의 독립된 전원이 공급된다.

(2) 정지냉각 흡입측 격리밸브와 관련된 연동장치는 원자로냉각재계통의 압력이 410psia(29kg/cm²a) 보다 높을 때 밸브가 개방되는 것을 방지한다.

(3) 격납건물 내부에 위치한 정지냉각계통 흡입측 격리밸브는 원자로냉각재계통 전체압력으로 설계되어 있으며, 두 번째 밸브는 압력경계와 등급경계를 형성한다.

- (4) 원자로냉각재계통 온도가 저온과압보호에 대한 최대 온도 이하로 내려가고 정지냉각계통 흡입부 격리밸브가 완전히 개방되지 않았을 때 흡입측 격리밸브(SI-V651, 652, 653, 654)의 경보장치가 작동된다. 또한 SI-V651과 SI-V653 또는 SI-V652, 654가 완전히 잠겨지지 않고 원자로냉각재계통 압력이 정지냉각계통 운전이 허용되는 최대압력이상으로 상승할 때 경보장치는 저온상태에서 압력상승 현상이 발생하고 있음을 운전원에게 알려준다.
- (5) 정지냉각 흡입배관 방출밸브가 설치되었다.
- (6) 보수적인 배관 설계와 용접연결을 최대한 활용하였다.

4. 계통 구성기기

가. 주요 구성인자(System Parameter)

정지냉각계통은 안전주입계통의 기능을 수행하므로 많은 기기들이 비상노심냉각계통(ECCS; Emergency Core Cooling System) 기준에 따라 설계되었고 원자로 냉각 운전 동안 정지냉각 기능을 수행할 수 있도록 설계되었다.

아래의 인자는 이에 적용된 기기들이다.

<표 4-13> 정지 냉각 시 필요한 기기 수량

인 자	필요 수량(1)	필요 수량(2)	비 고
다중 계열	2	1	
저압 안전주입펌프	2	1	
정지냉각 열교환기	2	1	
안전주입계통 주입배관	4	2	
정지냉각계통 흡입배관	2	1	
** 참고** (1) 설계기준 냉각률을 만족하기 위함 - 정지냉각계통의 운전이 원자로 정지 3.5시간 후에 시작되었다면 냉각재 온도를 350°F에서 125°F까지 냉각하는데 27.5시간이 소요된다. (2) 노심 내 온도차가 75°F 이상이 되지 않고 상온정지 기능을 수행할 수 있다.			

나. 유로 구성

정지냉각계통은 두 개의 원자로 용기 출구배관(Hot Leg) 각각에 설치된 16인치
의 정지냉각 흡입노즐로부터 저압 안전주입펌프와 정지냉각 열교환기를 거쳐 4개의
저압 안전주입 모관을 통해 원자로 입구측 배관(Cold Leg)으로 유로가 형성된다. 또
한 정지냉각계통은 원자로냉각재계통의 전 압력(Full Pressure)에서도 배관이 파열되
지 않도록 설계되어 있다.

다. 주요 구성 기기

(1) 저압 안전주입펌프

두 대의 저압 안전주입펌프는 수직형, 단단(Single Stage), 원심형, 유도전동기
구동형이다. 정지냉각 기간 중 저압 안전주입펌프는 원자로 용기 고온관측에서 흡입을
취하여 정지냉각 열교환기로 배출한다.

열교환기를 거쳐 나온 냉각수는 저압 안전주입 모관을 통해 원자로용기 저온관
으로 유입된다.

<표 4-14> 주요 기기의 규격

기 기 명		안전등급	기계적 분류코드	내진 등급	전기적 안전등급	능동/ 수동
저압 안전주입 펌프		2	ASME III, Class 2	I	안전등급	능동
원자로냉각재계통으로부터 SI-V653, 654 밸브를 포 함하는 곳까지의 배관 및 밸브		1	ASME III, Class 1	I	안전등급	능동
정지냉각 열교환기	튜브측	2	ASME III, Class 2	I	N/A	수동
	동체측	3	ASME III, Class 3	I	N/A	수동

한 대의 저압 안전주입펌프가 각 정지냉각 열교환기에 배열되며, 또한 이 펌프는 열적 과도상황에 견딜 수 있도록 설계되었다.

원자력교육원

<표 4-15> 저압 안전주입펌프 규격

명 칭	규 격	비 고
수량	2	
형식	1단, 수직, 원심형, 600Hp	
설계압력(psig)	900(63.3kg/cm ²)	
설계온도(°F)	400(204.4℃)	
설계유량(gpm) (펌프 우회유량 제외)	3,850(14.6×10 ³ l/min)	
축 밀봉	기계적 밀봉장치	
펌핑 유체	4,400 ppm 최대 보론 (2.5w/o Boric Acid)	

(2) 정지냉각 열교환기

정지냉각 열교환기는 발전소 냉각운전동안 노심의 붕괴열, 잠열, 안전펌프의 열을 제거하고, 상온정지 동안은 붕괴열과 펌프열을 제거하는데 사용된다. 정지냉각 열교환기는 95°F(35℃)의 기기냉각수 설계온도와 2년의 원자로심 평균 연소도를 가정하여 원자로정지 27.5시간 후에 125°F(51.7℃)의 평균 재장전수 온도를 유지하도록 설계된다. 보수적인 오염(Fouling) 저항이 가정되며 따라서 열교환기의 면적에 추가 여유분이 주어진다.

배관의 파단없이 원자로냉각재계통 전체압력을 견디기 위하여 열교환기의 설계압력은 900psig(63.3kg/cm²)로 되어 있다.

열교환기 규격은 [표 4-14]에 자세히 설명되어 있다.

<표 4-16> 정지냉각 열교환기 규격

명 칭	규 격	비고
수량	2	
형식	수평형 동체 및 튜브(U-튜브)	
열전달 계수(최대유량 시)	316.7Btu/hr - °F - ft ²	
설계압력(psig) - 튜브측/동체측	900(63.3kg/cm ²)/150(10.5 kg/cm ²)	
설계온도(°F) - 튜브측/동체측	400(204.4°C)/250(121.1 °C)	
유체 - 튜브측/동체측	원자로냉각재/기기 냉각수	
재질 - 튜브측/동체측	오스테나이트 스테인레스강 / 탄소강	
원자로 정지 27.5 시간 후 정격값 : 정지 후 27.5시간 이후 시점		
유량(lb/hr) - 튜브측/동체측	4,800gpm, 2.37×10^6 (1.08×10^6 kg/hr) 8,000gpm, 3.98×10^6 (1.81×10^6 kg/hr)	
입구 온도(°F) - 튜브측/동체측	125(51.7°C)/95(35°C)	
출구 온도(°F) - 튜브측/동체측	109.2(42.9°C)/104.4(40.2°C)	
열 부하(million Btu/hr): 동체	37.4(9.4×10^6 kcal/hr)	

(3) 배관

정지냉각계통의 모든 배관들은 오스테나이트 스테인레스강으로 되어 있다. 모든 배관의 연결부와 접합은 기기의 보수를 쉽게 하거나 기기 설계의 편의를 도모하기 위하여 사용된 최소한의 플랜지 연결 배관을 제외하고는 용접으로 되어 있다.

(4) 밸브

계통 밸브들은 원자력 발전소 기기제작 규정인 미국기계학회(ASME : American Society of Mechanical Engineers) 보일러 및 압력용기 코드 Section III -1989 에 따라 설계되었다.

기기 유지보수나 정지냉각계통 운전을 위해 격리밸브(저압 안전주입펌프에 대해 SI-691, 435, 692, 447 및 정지냉각 열교환기에 대해 SI-693, 695, 694, 696) 가 설

치되어 있다.

열교환기 튜브측 유량제어 및 발전소 냉각수를 제어하기 위해 조절밸브(SI-657, 658, 306, 307)들이 설치되어 있다. 저압 안전주입펌프 출구의 역지밸브(SI-434, 446)들은 과도적인 열효과(Thermal Effect)나 부적절한 고압 안전주입펌프의 운전에 의한 과압 및 역류(Reverse Flow)를 방지하기 위하여 설치되어 있다.

정지냉각 흡입 격리밸브들은 정지냉각계통의 과압을 방지하도록 연동되어 있다.

열적 방출밸브(Thermal Relief Valve : SI-169, 161, 194, 469, 193, 191)들은 격리된 배관 구간 내에서의 과압을 방지하는 기능을 가진다. 각 정지냉각 흡입배관의 방출밸브(SI-179, 189)는 정지냉각계통 운전 중 고압 안전주입펌프, 가압기 전열기, 충전펌프 및 원자로냉각재펌프의 사고운전(Accidental Operation)에 의한 과압을 방지하는 기능을 가진다. 또한 이 방출밸브들은 원자로냉각재계통의 저온과압(LTOP)방지 기능을 제공한다.

(가) 방출밸브

정지냉각계통의 기기는 계통 배관의 보수적인 설계, 고압원과 저압배관 사이의 적절한 밸브 조합, 그리고 방출밸브에 의해 과압으로부터 보호된다. SI-V653, SI-V654 밸브까지를 포함하는 정지냉각 계통 흡입배관은 원자로냉각재계통 전체압력으로 설계된다. 적용 코드에 따라 방출밸브가 설치된다. 모든 방출밸브는 전체적으로 감싸인 압력밀착 형식으로 밸브 고착을 방지하도록 적절한 장치가 되어있다. 각 방출밸브에 대한 설명은 아래와 같다.

1) 정지냉각 흡입배관 열 방출밸브(SI-V169, SI-V469)

이들 밸브는 각 정지냉각 흡입배관의 정지냉각 격리밸브들 사이의 배관을 온도증가에 따른 압력 상승으로부터 보호하기 위해 설계된다. 격납건물 내부에 위치하며 원자로배수탱크로 방출한다. 설정압력은 2,485psig(174.7kg/cm²)이며 용량은 각각 15gpm(56.8 L/min)이다.

2) 정지냉각 흡입배관 방출밸브(SI-V179, SI-V189)

정지냉각 동안 가압기 가열기의 작동, 고압 안전주입펌프의 작동, 충전펌프의 작동으로부터 정지냉각계통을 보호하도록 설계된다. 이 방출밸브는 격납건물 내부에

위치하며 격납건물 정상 배수조로 방출한다. 설정압력은 505psig(35.5kg/cm²)이며 용량은 각각 5,635gpm(21,330 L/min)이다.

3) 정지냉각 열교환기 모관방출밸브(SI-V191, SI-V194)

이들 밸브는 격리된 열교환기를 기기냉각수의 온도 상승으로 인한 과압으로부터 보호하도록 설계된다. 기기배수탱크로 방출하며, 설정압력은 900 psig(63.3kg/cm²)이며 용량은 각각 120gpm(454.2 L/min)이다.

4) 정지냉각 열교환기와 저압 안전주입 모관의 연결배관 방출밸브(SI-V161, SI-V193)

이들 밸브는 격리된 배관을 온도 상승으로 인한 과압으로부터 보호하도록 설계된다. 기기배수탱크로 방출하며, 설정압력은 900psig(63.3kg/cm²)이고 용량은 각각 10gpm(37.8 L/min)이다.

(나) 구동자 작동 교축(Throttle)밸브와 차단밸브

작동신호 또는 전원상실 시에 대한 각 밸브의 고장 후 위치는 안전한 운전을 보장하도록 작동된다. 모든 밸브에 대해 고장 후 위치를 결정할 때는 계통의 다중성이 고려된다.

주제어실에 잠금 형식의 제어스위치와 수동 오버라이드 핸드휠이 발전소의 효율적이고 안전한 운전을 위해 필요한 밸브에 제공된다. 모든 구동자 작동밸브는 랜턴링(Lantern Ring) 누수 연결관이 있는 이중 패킹에 의해 스템의 누수가 조절된다.

라. 제어 및 계측

정지냉각 온도, 유량율, 압력 등을 주제어실에서 감시할 수 있는 계측기기가 구비되어 있다. 정지냉각계통 운전중 모든 밸브들은 주제어실에서 제어할 수 있으며, 정지냉각계통 흡입관 격리밸브 관련 정보는 밸브의 정렬상태 및 원자로냉각재계통의 상태를 주제어실에 알려 준다.

정지냉각계통 흡입관측의 전동기 구동밸브들은 원자로냉각재계통에 의한 정지냉각계통의 과압을 방지하도록 연동되어 있다.

마. 저온과압보호(LTOP)

원자로 저온운전 동안에는 1차측 안전밸브들이 과도상태동안 과압보호를 하지

못한다. 그러므로 원자로냉각재계가 냉각되었을 때 원자로용기의 취성과파괴에 대한 보호를 제공하기 위해 저압 설정된 방출계를 원자로냉각재계통으로 배열해야 한다. 이 방출계를 저온과압보호계통(LTOP)이라고 한다. 이 계통은 저온운전 중 원자로냉각재계가 압력-온도 곡선(P-T Curve) 제한치를 초과하지 못하도록 한다.

한국표준형 원전에서는 정지냉각계통 흡입측에 각각 1개씩의 방출밸브(SI-179/189)가 있다. 이들은 스프링 구동밸브로서 505psig(35.5kg/cm²)에 설정되어 있다.

이 밸브의 용량은 5,635gpm(21,330 L/min)으로 2대의 고압 안전주입펌프, 3대의 충전펌프에 대한 체적팽창 및 가압기의 전 가열기에 의한 열과 붕괴열에 의한 체적팽창을 방출할 수 있는 충분한 용량이다.

저온과압보호계통은 단일고장기준(Single Failure Criteria)을 만족한다. 즉 1개의 저온과압보호계통 방출밸브가 운전불능 일 때 다른 쪽의 방출밸브가 저온과압보호계통을 제공할 수 있도록 충분한 용량을 가지고 있다는 것을 의미한다.

이 저온과압보호계통 방출밸브는 격납용기 정상 배수조(Normal Sump)로 방출되도록 설계되어 있다.

5. 계통 운전

가. 발전소 정상상태에서의 운전

원자로가 정상 운전중일 경우 정지냉각계통은 운전되지 않고 원자로냉각재계통에서 격리되어 있다.

나. 발전소 기동

발전소 기동은 원자로냉각재계통을 상온정지 상태에서 고온대기 상태로 바꾸어주는 일련의 과정으로서, 정지냉각계통은 발전소 상온정지 기간 중 원자로냉각재의 온도 제어 및 원자로냉각재계통의 저온과압 방지 기능을 수행한다.

열교환기의 열제거 없이 노심으로 유량을 순환시키기 위해 정지냉각계통 열교환기를 우회한다. 가열유를 제어하기 위해 필요에 따라 열교환기로 유량을 형성할 수 있다. 원자로냉각재펌프가 기동될 수 있고, 원자로냉각재 온도와 압력이 350°F(176.7°C), 410psia(28.8kg/cm²a)에 도달하기 전에 정지냉각계통을 원자로냉각재계통으로부터 격리

하고, 저압 안전주입펌프는 정지되어 안전주입 유로로 배열되어야 한다. 정지냉각계통은 발전소가 다시 정지될 때까지 안전주입 유로로 계속 배열되어 있어야 한다.

다. 발전소 냉각

발전소 냉각은 원자로를 고온정지에서 상온정지 상태로 냉각하는 일련의 수동 운전이다. 발전소가 정지된 후 초기 발전소 냉각은 주증기 우회제어계통을 이용하여 증기발생기 이차측 증기를 방출함으로써 이루어진다. 원자로냉각재계통 압력이 2,150 psia(151.1kg/cm²) 이하로 감압되면 안전주입작동 신호 설정치는 수동으로 하향 조절된다. 원자로냉각재계통 압력이 625psig(43.9kg/cm²)에 도달하면 안전주입탱크의 압력을 400psig(28.1kg/cm²)로 감압한다. 원자로냉각재계통 압력이 400psig(28.1kg/cm²)에 도달하면 안전주입탱크 격리밸브를 닫는다.

원자로냉각재 온도와 압력이 350°F(176.7°C), 410psia(28.8kg/cm²)이하로 떨어지면 정지냉각계통 운전이 가능하다. 정지냉각계통 흡입관 격리밸브는 연동 및 경보 기능을 가지고 있으며, 흡입관 방출밸브는 정지냉각계통과 원자로냉각재계통의 저온과압을 방지하는 기능을 가진다. 두 개의 정지냉각 흡입배관에 설치된 여섯 개의 밸브 연동은 원자로냉각재계통 압력이 410psia(28.8kg/cm²) 이상이 되면 개방되지 않도록 되어 있다.

원자로냉각재 저온관 온도가 저온과압 보호가 요구되는 최대 원자로냉각재계통 저온관 온도 이하가 될 때까지 흡입 격리밸브가 완전히 개방되지 않았을 경우 정지냉각계통 흡입측 격리밸브(SI-651, 652, 653, 654)를 개방하도록 하는 경보가 발생된다. 이 운전원 조치는 정지냉각계통 연동을 제거하기 위하여 원자로냉각재 압력을 낮추게 되는 것이다. 저온과압 방지운전이 필요한 최대온도는 압력-온도 곡선에 따른 평가를 기초로 한다.

또한 정지냉각계통 흡입부 격리밸브인 SI-651과 653 또는 SI-652와 654가 완전히 잠겨지지 않았고 원자로냉각재계통 압력이 정지냉각계통 운전이 허용되는 최대 압력 이상으로 상승할 때 경보장치는 저온상태에서 압력 상승현상이 발생하고 있음을 운전원에게 알려준다.

밸브들은 단일고장(Single Failure)에 의해 정지냉각계통의 어느 한 계열이라도 과압되지 않고 원자로냉각재계통의 압력이 허용범위 내에 있을 때 최소한 한 계열의

정지냉각계통이 운전되도록 전원계통과 연동이 되어 있다.

라. 비정상 운전

가장 심각한 단일고장(한 트레인의 정지냉각계통 상실) 때 정지냉각계통의 운전은 운전 가능한 트레인에 대한 발전소 냉각절차서에 따라 수행된다.

저압 안전주입펌프의 보조기능으로서 격납용기 살수펌프를 이용할 수 있도록 격납용기 살수계통으로 연결관이 설치되어 있다.

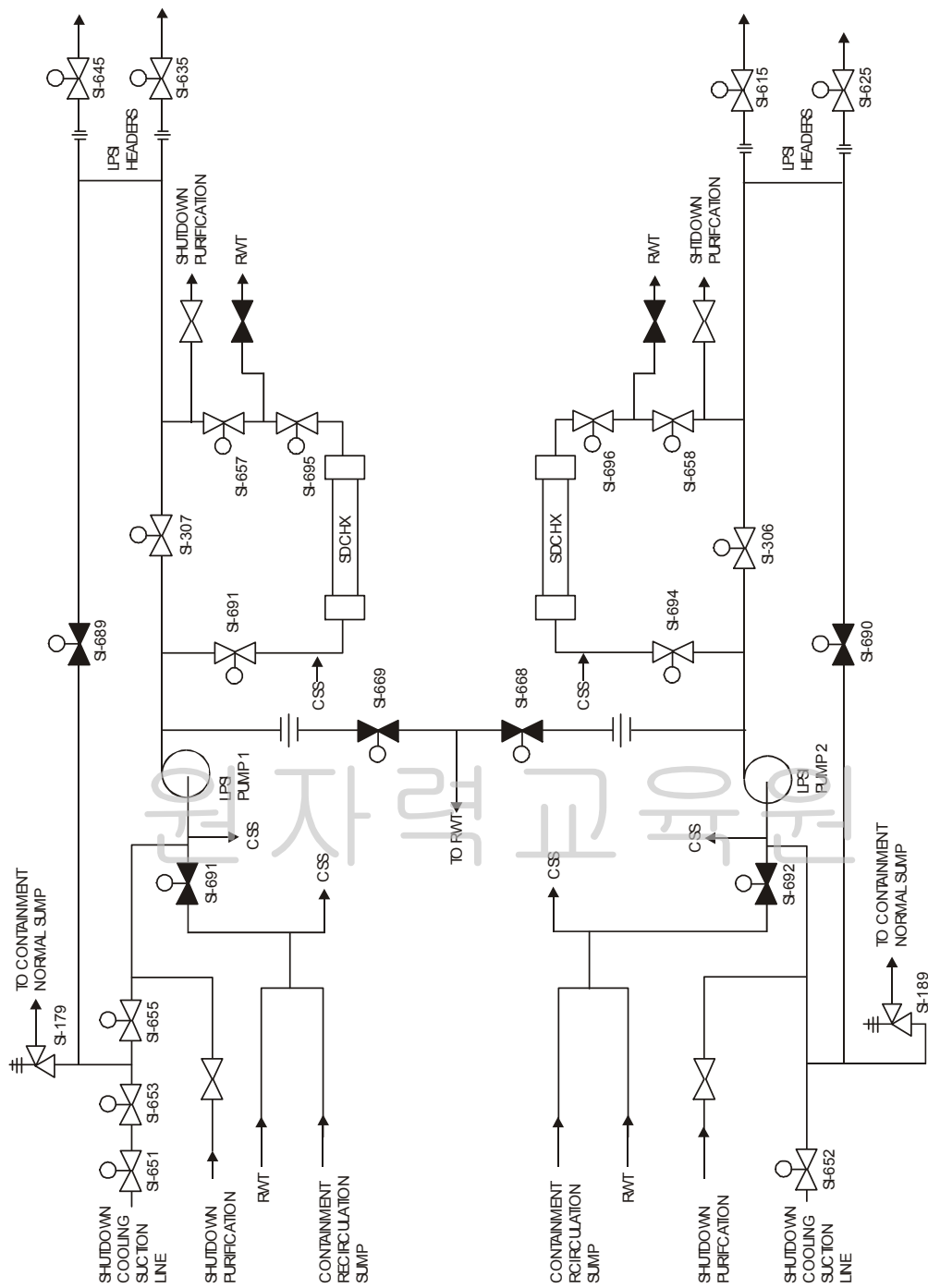
마. 설계기준사고 운전

어떠한 설계기준사고(급수관 파단, 소형파단 냉각재상실사고, 증기관 파단, 또는 소외전원 상실) 후에는 정상 정지냉각 개시 온도 350°F(176.7°C)보다 높은 원자로냉각재계통 고온 조건에서 정지냉각을 시작해야 할 필요가 있을 수 있다. 그러나 정지냉각 기기의 설계온도 400°F(204.4°C)를 초과하는 조건에서는 절대 운전되지 않는다.

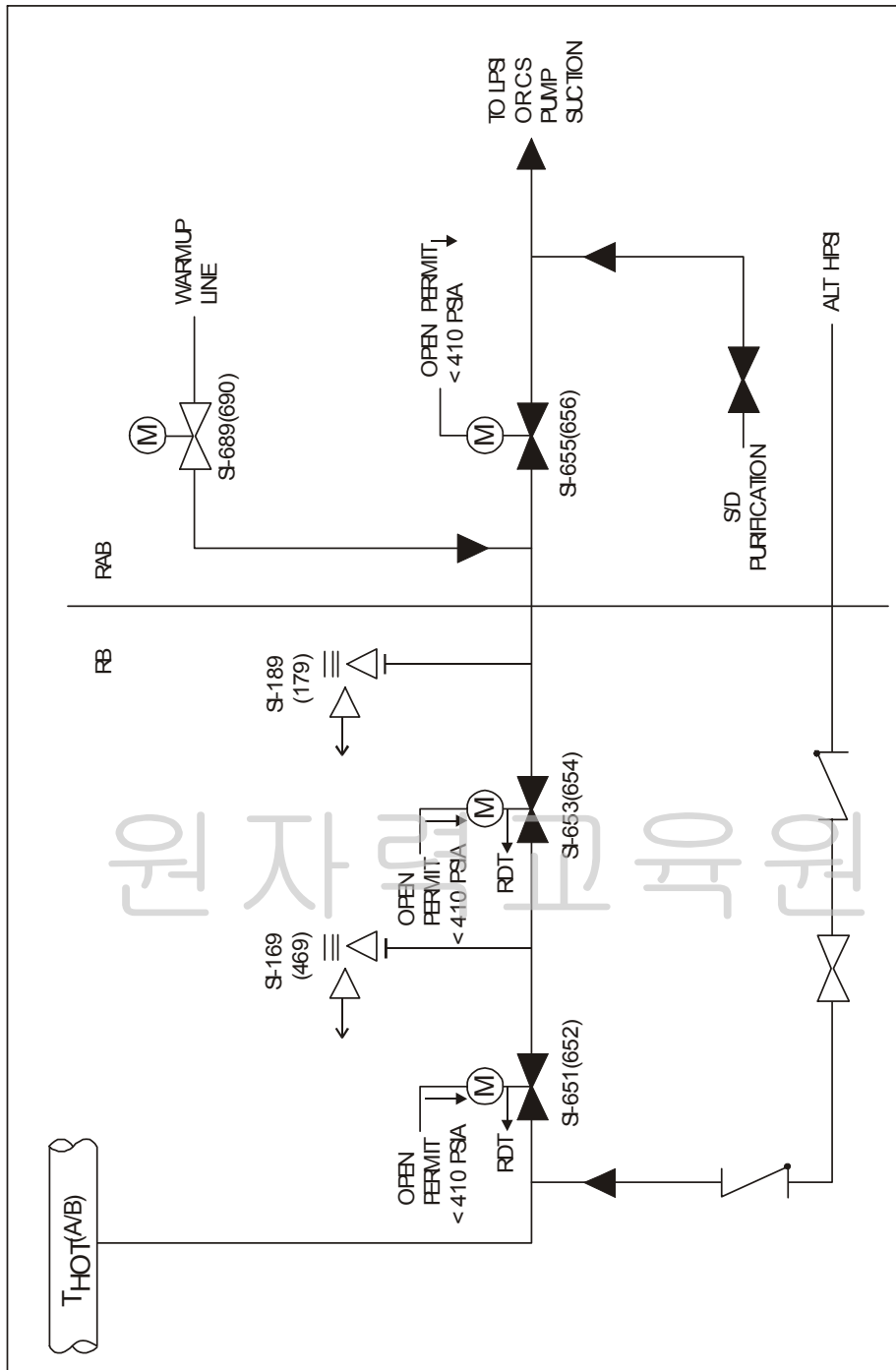
발전소가 사고 상황일 경우 정지냉각계통은 자동으로 운전되지는 않는다.

사고 후 원자로냉각재계통에 열 축적을 방지하기 위한 장기 재순환 운전 시 정지냉각계통의 수동운전이 필요하다.

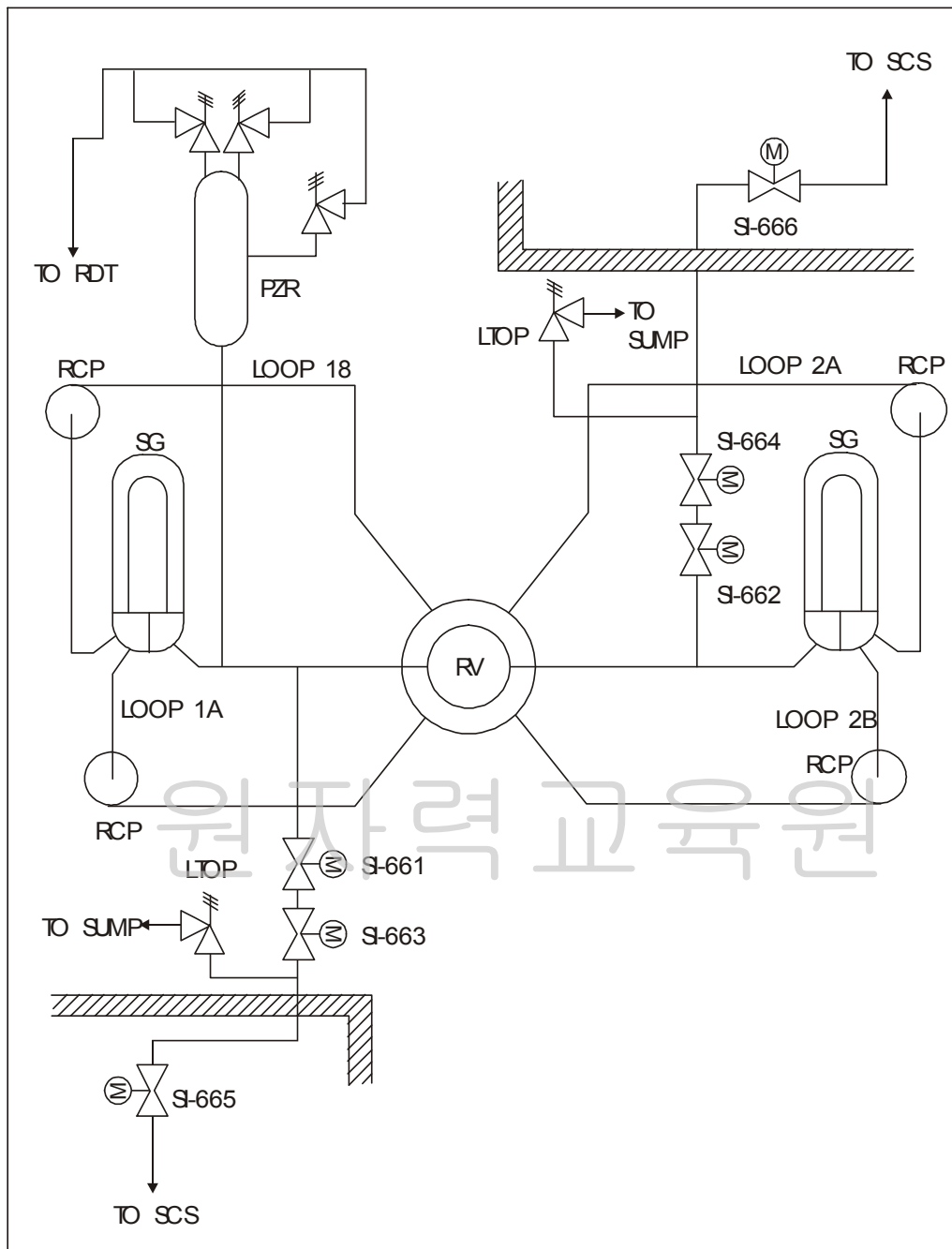
원자력교육원



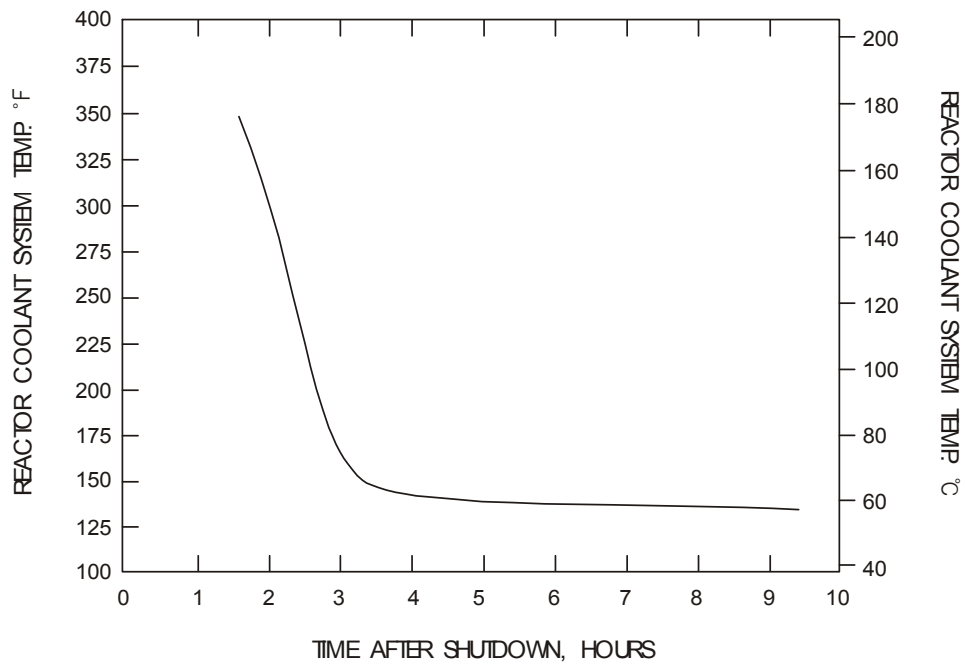
[그림 4-39] 정지냉각계통 개략도



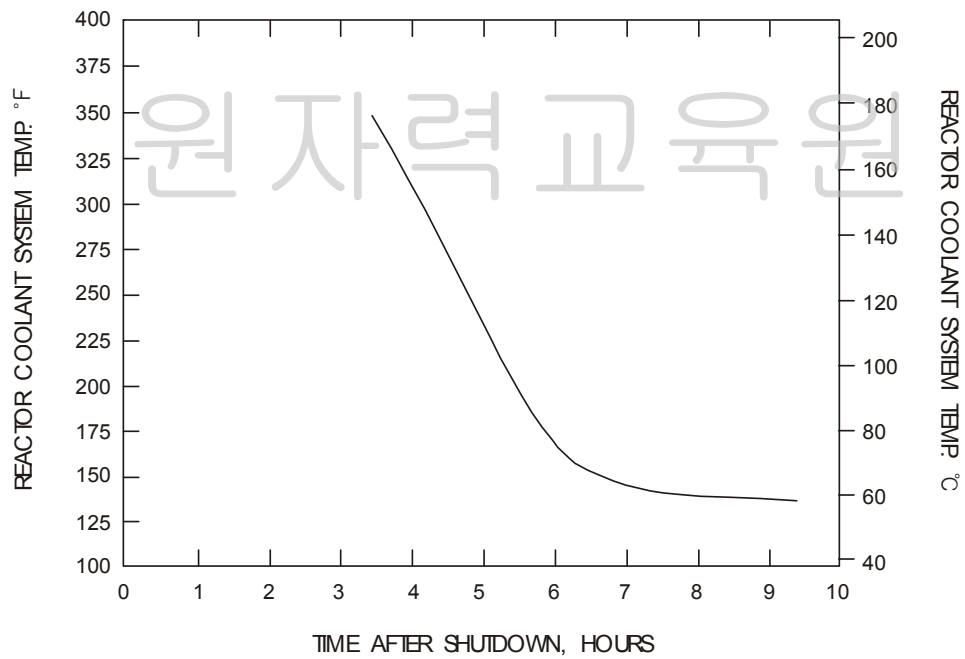
[그림 4-40] 정지냉각계통 흡입모관 격리밸브



[그림 4-41] LTOP 방출밸브를 포함한 RCS 개략도



[그림 4-42] 정지냉각계통의 두 트레인을 사용한 냉각



[그림 4-43] 정지냉각계통의 한 트레인만을 사용한 냉각

[핵심요약]

원자로는 정지 후에도 노심에 잔열 및 붕괴열이 존재하여 적당한 냉각수단을 확보하지 않으면 노심의 온도가 상승하여 연료 및 구조물의 건전성을 위협하게 된다. 즉 잔열에 의한 노심 건전성의 손상을 피하기 위해서는 적절한 냉각수단을 강구해야 한다. 이와 같은 노심 잔열제거 수단으로서 설계된 계통이 정지냉각계통이다.

원자로가 정지된 후 초기에는 2차측 증기우회제어계통을 이용하여 증기발생기에서 잔열을 제거하나 마지막 단계, 즉 원자로냉각재계통이 350°F(177°C), 410psia(29kg/cm²a) 이하로 냉각되면 정지냉각계통을 운전하여 기기냉각수에 의한 잔열제거 운전을 수행한다. 발전소 정지과정에서 잔열을 제거함에 있어 중요한 계통기기의 과도한 열응력을 피하기 위해 운전원은 기술지침서 및 관련 절차서에 명시된 냉각률을 초과하지 않아야 한다.

또한 정지냉각계통은 발전소 기동 중에 가열유를 제어하는 수단과 연료 재장전수 공급 및 회수 수단 등도 제공하고 있다.

정지냉각계통은 증기발생기의 대기방출 기능 및 보조급수계통과 더불어 소형 파단 냉각재상실사고 후에 원자로냉각재계통을 냉각시키는데 사용된다. 정지냉각계통은 증기관과 급수관 파단사고, 증기발생기 전열관 파단사고 후와 발전소 기동 시 원자로냉각재펌프가 운전되기 전에 노심으로의 유량을 유지시키기 위하여 사용된다.

제5절 격납용기살수계통

[학습목표]

1. 격납용기살수계통의 기능 및 설계기준을 이해하고 설명할 수 있다.
2. 격납용기살수계통의 구성기기 및 계통운전을 이해하고 설명할 수 있다.
3. 격납용기살수계통의 안전성 평가 및 제어연동을 이해하고 설명할 수 있다.

1. 개 요

격납용기살수계통은 유일한 격납용기 능동 열제거계통이다. 격납용기살수계통은 사고 시 격납용기 대기로부터 요오드 및 기타 방사성 물질을 제거하고, 가연성 기체의 국부적 침적을 방지하기 위해 격납용기 대기를 혼합시키며, 사고 후 격납용기의 열 에너지를 제거함으로써 온도와 압력을 감소시키는 기능을 한다. 격납용기살수계통의 열 제거 기능은 여기에서 언급되며 핵분열물질 제거기능은 최종 안전성 분석보고서(FSAR : Final Safety Analysis Report) 6.5.2절에 기술되어 있다. 설계기준 사고인 냉각재상실사고 시 격납용기살수계통의 성능은 FSAR 6.2.1.1절에 평가되어 있다.

2. 설계기준

격납용기살수계통은 냉각재상실사고, 제어봉인출사고 또는 격납용기 내부에서 주중기관 또는 주급수관 파단 시 격납용기 대기로부터 핵분열물질과 열을 제거하도록 설계되어야 한다.

- 가. 피동적 열제거를 동시에 고려한 이 계통의 열제거 성능은 격납용기 설계압력 및 온도를 초과하지 않도록 하며, 위에서 언급한 사고 시 24시간 이내에 격납용기 압력을 계산된 최대압력의 최소 50%이하로 감소시키기에 충분하여야 한다.
- 나. 격납용기살수계통은 냉각재상실사고 이후 9시간 이내에 격납용기 재순환 집수조의 온도를 228°F(108.9℃) 이하로 감소시키도록 설계되어야 한다.

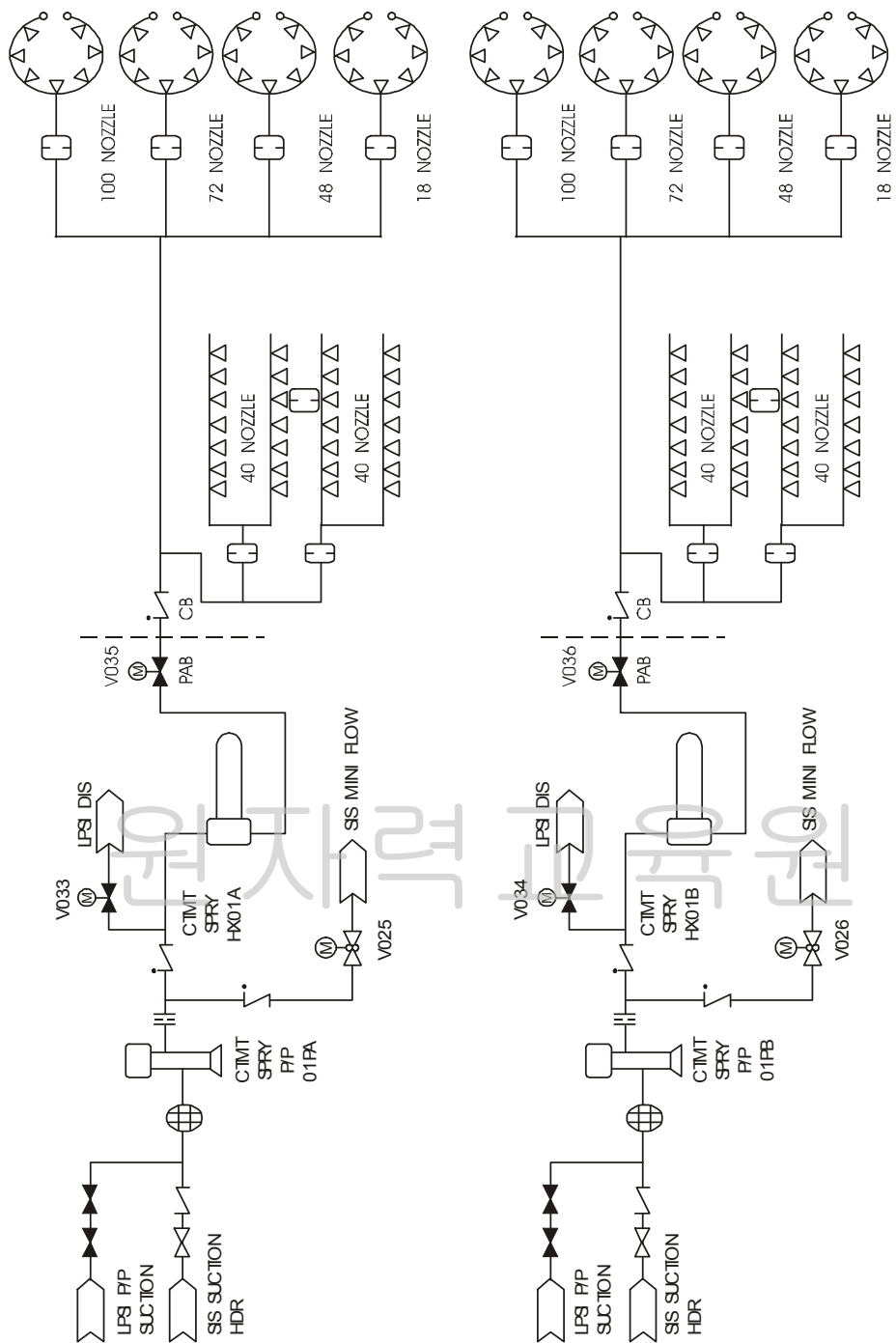
다. 격납용기살수계통은 비상노심냉각계통과는 독립적으로 열제거 기능을 수행하도록 설계되어야 한다.

3. 계통 설명

가. 개 요

격납용기살수계통은 화학 및 체적 제어계통의 핵연료재장전수탱크 및 격납용기 재순환집수조, 2대의 격납용기 살수펌프, 2대의 격납용기 살수 열교환기, 2개의 독립된 주 살수 및 보조 살수 모관, 배관, 계측장비들로 구성되어 있다. [그림 4-14]은 격납용기살수계통의 개략도를 보여주고 있다. 격납용기살수계통은 원자로냉각재 압력경계 또는 격납용기 내부에서의 주증기 및 주급수계통의 배관 파단 시 격납용기 상부로 붓산수를 공급함으로써 격납용기 내의 온도와 압력을 감소시키며, 핵분열생성물을 제거하도록 설계되어 있다. 격납용기살수펌프는 핵연료재장전수저장탱크 또는 격납용기 재순환집수조에서 취수하여 살수하게 된다. 살수펌프는 격납용기 살수 열교환기와 살수모관 및 각 살수노즐을 통하여 격납용기 대기로 살수용액을 방출하도록 되어 있다.

주 살수모관은 살수되는 물방울이 대기의 핵분열성 물질을 흡수하는 시간을 최대화하고 증기와 공기가 대기에서 열적 평형을 이룰 수 있도록 하기 위하여 격납용기의 상부에 설치되며, 보조 살수모관은 환형지역(2차 차폐벽과 격납용기 외벽사이), 운전층 하부의 격실과 운전층 상부의 주 살수 노즐에 의해 살수된 영역의 대기혼합을 최대화할 수 있도록 운전층 하부의 120ft에서 140ft 사이에 설치되어 있다. 살수에 의한 증기의 응축으로 격납용기의 온도 및 압력이 감소된다. 격납용기의 비 살수지역의 대기는 자연순환 살수지역의 대기와 혼합되도록 한다.



[그림 4-44] 격납용기살수계통 개략도

나. 구성 기기

격납용기살수계통 주요 기기의 설계자료 및 용량은 <표 4-15>에 열거되어 있으며, 추가적인 요건 및 설명은 아래와 같다.

(1) 격납용기 살수펌프

2대의 격납용기 살수펌프는 유도전동기에 의해 구동되는 수직형, 단상, 원심형 펌프이다.

최소유량 우회배관은 격납용기 살수펌프가 폐회로에서 펌프 후단의 차단으로 인해 펌프가 손상되지 않도록 하기 위하여 살수펌프 방출부에 설치되며 핵연료재장전 수저장탱크에 연결되어 있다.

펌프의 축 밀봉재질은 살수유체에 적합한 재질로 되어 있다.

펌프의 밀봉손상 시 유량손실을 최소화하도록 유량 제한기가 설치되어 있으며, 펌프의 배기 및 배수 연결구가 설치되어 있고, 펌프 흡입부의 배수 연결구가 펌프의 케이싱에 설치되어 있다. 정비에 앞서 펌프의 완벽한 배수 및 세척으로 방사능 준위를 감소시킬 수 있도록 되어 있다.

펌프에서 압력을 받는 부분의 재질은 미국기계학회(ASME : American Society of Mechanical Engineers) Code Sec. III, 등급 2 요건에 따라 스테인레스강으로 제작되어 있다. 기타 다른 모든 부분의 재질은 펌프를 흐르는 유체와의 적합성 관점에서 검토되어야 한다.

(2) 격납용기 살수 열교환기

격납용기 살수 열교환기는 사고 시 및 사고동안 격납용기 대기의 열을 제거하도록 되어있다. 열교환기는 사고 후 24시간 이내에 격납용기 대기압력을 최대 압력의 50% 이하로 감소시키도록 설계되어 있다.

격납용기 살수 열교환기의 제원은 <표 4-15>에 제시되어 있다. 격납용기 살수 열교환기의 동체측 냉각수는 1차 기기냉각수계통에서 공급하도록 되어있다.

(3) 살수모관 및 노즐

격납용기 살수노즐은 주 살수노즐과 보조 살수노즐로 구성되어 있다. 주 살수노즐은 격납용기 상부에 위치한 살수 모관에 설치되어 있으며 열전달 면적을 증가시키

기 위하여 살수용액을 물방울 형태로 격납용기에 살수하도록 되어 있다. 즉 살수노즐 및 모관은 운전층에서 최소 90%의 단면적과 운전층 상부 격납용기의 최소 75% 용적을 살수하도록 설치된다. 보조 살수노즐 및 모관은 격납용기 대기의 혼합능력을 향상시키고 수소기체가 국부적으로 집적되는 것을 방지하기 위하여 운전층 하부의 120ft에서 140ft사이의 환형지역, 운전층 하부의 격실과 운전층 상부의 주 살수노즐에 의해 살수된 영역에 설치되어 있다.

살수노즐에 적용되는 설계기준은 다음과 같다.

- (가) 주 살수노즐에서 살수되는 물방울의 평균지름은 노즐을 통한 설계 압력차에서 약 1,000 μ m 이하이어야 한다.
- (나) 주 살수노즐은 운전 중에 살수노즐이 막히지 않도록 하기 위하여 노즐의 오리피스 구경이 최소 0.25inch(6.35mm) 이상이어야 한다.
- (다) 설계 운전조건에서의 주 살수노즐을 통한 유량은 최소 15.2gpm(57.6 L/min)이어야 하며 보조 살수노즐을 통한 유량은 최소 3gpm(11.3 L/min)이어야 한다.

(4) 밸브

격납용기 살수 모관 격리밸브는 격납용기 살수 작동신호에 따라 전면 개방되는 전동기구동 밸브이다. 격납용기 살수펌프의 최소 유량 우회배관 격리밸브는 재순환 운전동안에 살수용액이 핵연료재장전수저장탱크로 유입되는 것을 방지하기 위하여 재순환작동신호(RAS)에 따라 닫히는 전동기구동 밸브이다. 밸브의 작동신호 오류 또는 전원공급의 상실 시에도 안전 운전의 보장을 위하여 각 밸브의 고장 후 안전위치가 선택되도록 설계되어 있다. 발전소의 적정운전과 안전운전을 보장하기 위하여 주제어실에 밸브의 위치지시계가 설치되어 있다.

(5) 격납용기 재순환 집수조

격납용기 내에 해당 계열의 안전주입계통과 격납용기살수계통에 공급하기에 충분한 용량의 재순환 집수조가 두 개 설치되어 있다. 이 재순환 집수조는 각각 7ft(폭) × 8ft(길이) × 6ft(높이)의 크기를 갖는 사각 집수조이다. 깊이가 6ft인 이 집수조는 원자로 수조를 제외하면 격납용기 내에서 가장 낮은 위치를 점유한다. 이는 설계기준 사

고가 발생하면 격납용기 내로 유출되는 냉각재가 이 재순환 집수조에 우선 집수되도록 하고 공학적안전설비계통의 각 펌프가 재순환 운전 시 충분한 유효 흡입수두를 갖도록 하기 위함이다. 정상운전시의 격납용기 배수가 이 재순환집수조로 유입됨을 방지하기 위해 재순환집수조의 입구주변은 바깥쪽으로 흐르는 경사를 이루게 하였다. 정상운전시의 격납용기 배수는 정상 집수조(Containment Normal Sump)에 집수된다. 재순환집수조의 입구는 그레이팅(Grating), 트레이 랙(Trash Rack) 및 여과망(Inner Filter)으로 보호되어 있어 이물질의 유입을 방지한다. 내부 여과망은 유체가 약 0.2 ft/sec의 속도를 갖도록 설계하였는데 이때 설계속도를 결정하기 위해 가용 면적을 내부 여과망 자유 표면적의 1/2로 하였다. 여과망 눈금크기는 집수조로 0.09inch 지름 이상의 입자가 유입됨을 방지할 수 있도록 설계하였는데 이는 고압안전주입펌프와 격납용기살수펌프의 설계상 최대 허용입자 크기와 일치하는 것이다. 재순환 운전 시에는 내부 여과망과 바깥쪽 트레이 랙은 완전히 물에 잠기게 된다.

다. 계통 운전

(1) 출력운전 모드

발전소 출력 운전 중 격납용기살수계통은 비상 운전을 위해 대기상태로 유지한다.

(2) 기동 및 정지운전 모드

발전소 기동 및 정지운전 동안은 출력운전 모드와 마찬가지로 대기 상태를 유지하며 만약 발전소 정지운전 기간 중에 1대 혹은 2대의 저압안전주입펌프가 운전 불가능할 경우 발전소 냉각운전을 위해 저압안전주입펌프의 보조 역할을 수행한다.

(3) 비정상 운전

(가) 주입운전

격납용기 살수 동작신호가 발생하면 격납용기살수펌프 기동 헤더 격리밸브 개방, 안전주입 및 정지냉각계통 밸브가 닫힘으로서 핵연료재장전수저장탱크에서 붕산수(4,000~4,400ppm)를 흡입하여 격납용기 대기에 살수한다.

(나) 재순환 운전

재순환작동신호가 발생하면 격납용기살수펌프의 입구 유로가 핵연료재장전수

저장탱크에서 격납용기 재순환집수조로 전환되며 격납용기 재순환집수조의 재고량 감소를 방지하기 위해 최소 유량관 격리밸브는 닫힌다. 이때 격납용기 재순환집수조 격리밸브는 자동으로 개방되고 핵연료재장전수저장탱크 격리밸브는 운전원이 수동으로 닫는다.

4. 안전성 평가

격납용기살수계통은 일반설계기준(GDC; General Design Criteria) 2, 38, 39 및 40의 요건을 만족하도록 설계되어 있다.

격납용기살수계통의 기기들은 일반설계기준에 규정되어 있는 최대 가상 홍수 및 기타 자연현상의 사고 시에도 주어진 기능을 수행할 수 있도록 설계에 반영되어 있다.

격납용기 격리를 위해 사용된 밸브는 그 밸브 기능을 방해할 수 있는 고 에너지 또는 중 에너지 배관 파단으로부터 보호되어 있다.

재순환 운전동안, 격납용기살수계통에서 수동고장으로 인한 제한된 누설사고 또는 이로 인한 증기, 압력, 온도, 방사선, 유효흡입수두의 상실, 범람, 살수, 재순환 유량 감소 등의 영향은 계통의 최소 수용 가능 재순환 성능 (최소 수용가능 성능은 한 개의 부계통의 운전으로 정의된다.)의 이용도를 감소시키지 않도록 되어있다. 격납용기살수계통은 재순환 운전동안 펌프의 흡입부에 약 33ft(10.1m)의 정수두를 갖도록 설계되어 있다. 자세한 분석결과, 고압 안전주입펌프, 저압 안전주입펌프, 격납용기살수펌프들은 최대 유량 조건에서 운전될 경우 배관의 마찰에 의한 수두 손실을 고려하면 약 26ft(7.92m)의 실제 유효흡입수두를 갖게 된다. 이 값은 격납용기살수펌프의 예상되는 요구 유효 흡입수두인 19ft(5.79m)보다 큰 값이다. 실제 유효흡입수두가 선택된 펌프의 요구 유효흡입수두를 적정 여유를 갖고 초과함을 보장하기 위하여 이 실제 유효흡입수두는 확정된 기기 위치 및 배관 설치자료에 근거하여 입증되었다. 이 유효흡입수두 분석에서 격납용기 압력은 고려되지 않았다.

재순환 운전동안, 격납용기의 열제거를 위하여 격납용기 살수 열교환기가 사용되며, 동체측의 냉각수는 기기냉각수계통으로부터 공급되도록 되어있다. 열제거 성능은 기기 공급자가 제공한 관련자료 등을 고려하여 결정되었다. 격납용기 재순환집수조는

규제지침서(Reg. Guide) 1.82의 요건을 만족하도록 설계되어 있다. 격납용기 재순환 집수조에는 재순환 운전동안 공학적안전설비의 기기나 배관에서의 유체막힘을 방지하기 위해 재순환 배관으로 들어가는 최대 입자의 크기를 직경 0.09인치(0.23cm) 이하로 제한하도록 이물질 스크린이 설치되어 있다. 그리고, 격납용기 배수 재순환집수조로 공기나 증기가 혼입되는 것을 막기 위해 와류 제한기가 설치되어 있다. 또한 규제지침서 1.82에 따라 격납용기 재순환 집수조로 이어지는 바닥이 집수조쪽으로 경사를 주도록 설계되어 있다. 이물질 스크린망 가까이에는 이물질의 유입을 최소화하기 위해 6인치(15.2cm)의 연석이 설치되어 있다. 격납용기 재순환집수조의 막힘 분석은 냉각재상실 사고 발생 시 모든 차폐 이물질들이 바닥에 고여 있지 않고 이물질 스크린망으로 유입된다는 보수적인 가정 하에 이루어졌다.

따라서 모든 이물질이 이물질 스크린망을 통과하면서 수두손실을 일으킨다는 가정 하의 막힘을 고려하여 크기가 결정되었다. 또한 이물질 스크린망은 이물질에 의해 막히는 경우 야기되는 수두손실까지 고려된 유효흡입수두가 격납용기살수펌프, 저압안전주입탱크, 고압안전주입펌프의 유효흡입수두 요건을 초과하도록 그 크기가 결정된다. 격납용기살수계통은 배관타격, 파단 및 비산물로부터 보호되어 있다.

격납용기살수계통의 격납용기 관통부와 다중의 배관경로는 격납용기살수계통의 안전주입모드 동안 단일 능동기기 고장, 재순환모드 동안 단일 능동고장 또는 수동고장으로 인해 제한된 누설 등이 발생하더라도 기능 요건을 만족하도록 적절히 물리적으로 분리되어 있다.

격납용기살수계통의 필수 1E급 회로의 다중 채널과 관련한 전선은 다중성을 보장하고 여러 채널의 이상작동 혹은 채널 상호작동으로 인한 단일사고를 방지하기 위하여 물리적으로 분리되어 있다. 다중 채널의 관련 회로 선로는 분리되면서 격리장치가 설치되거나, 단일 고장이 1E급 회로의 다중 채널에 영향을 주지 않는다는 것을 입증하기 위하여 시험 또는 분석이 수행된다.

1E급 회로가 설치되는 장비의 위치 선정 시와 격납용기살수계통의 1E급 회로의 설치 시 예상되는 배관파단, 화재 및 범람 등 잠재적 위험에 노출되는지를 고려하여 적절한 분리 또는 보호수단이 제공되어 있다.

비안전등급 계통의 고장은 격납용기살수계통의 다중성에 영향을 주지 않도록 되어 있다.

5. 제어연동

가. 격납용기 재순환 집수조 격리밸브(SI-675, 676)

이 밸브는 24" 크기의 전동기 구동 나비형밸브이다. 닫힘 상태에서 완전 열림까지의 행정 시간은 약 30초이다. 집수조 격리밸브의 조작은 주제어실에서 행해진다.

정상 대기 시에는 ‘자물쇠 잠금-닫힘’에 위치하며, 재순환작동신호가 발생하면 이 밸브는 자동으로 열리게 되는데 이때 밸브의 열적, 기계적 과부하 보호신호는 무시된다. 이는 사고시 공학적안전설비 공급원으로서의 기능을 보다 확실하게 수행하기 위함이다.

나. 격납용기살수펌프 흡입밸브(CS-V1001, 1002)

이 밸브는 18" 크기의 수동 게이트밸브이며 정상운전 시 열림상태로 유지해야 한다. 또한 열림상태에서 자물쇠 잠금으로 오조작에 의한 펌프 흡입상실 가능성을 줄여야 한다.

다. 격납용기 살수 최소유량 재순환밸브(CS-V0025, 0026)

4" 크기의 전동기구동 글로브밸브인 격납용기 살수 최소유량 재순환밸브는 보조 건물에 위치하며 주제어실에서 조작된다. 정상 시 밸브는 열림상태를 유지하는데 재순환작동신호가 발생하면 10초 이내에 닫히게 된다. 재순환작동신호에서 이 밸브가 닫히는 것은 다음 세 가지 이유에서이다.

첫째, 격납용기살수펌프 재순환유로가 핵연료재장전수탱크로 배열되어 있어 재순환작동신호 발생시 밸브가 열려 있으면 격납용기 재순환집수조의 물이 핵연료재장전수저장탱크로 보내지게 된다. 이는 공학적안전설비의 흡입수원으로 작용하는 격납용기 집수조의 수위를 떨어뜨리는 결과를 초래하게 되며, 이는 공학적안전설비계통에 속하는 각 펌프들의 유효흡입수두를 상실 할 수도 있다.

둘째, 원자로냉각재상실사고 후 재순환작동신호가 발생 시 격납용기재순환집수조는 방사능으로부터 오염이 된 상태이므로 핵연료재장전수저장탱크로 재순환수가 유입

되는 것을 방지해야 한다.

셋째, 재순환작동신호 발생 시점에서는 이미 주 유로가 형성되어 더 이상 최소유량은 불필요하다.

라. 격납용기살수계통 모관 격리밸브(CS-V0035, 0036)

10인치 크기의 전동기구동 게이트밸브인 격납용기살수계통 모관 격리밸브는 보조건물 내에 설치되어 있으며 주제어실에서 조작된다. 정상 시에는 부주의에 의한 살수동작을 방지하기 위해 닫혀 있는데 격납용기살수작동신호가 발생하면 5초 이내에 자동으로 열린다.

격납용기살수작동신호가 발생하여 밸브가 열림 동작을 할 때는 열적, 기계적 과부하에 의한 전동기 보호기능은 무시된다.

마. 핵연료재장전수저장탱크 방출밸브(CV-530, 531)

20" 크기의 전동기구동 게이트밸브인 핵연료재장전수저장탱크 방출밸브는 안전주입펌프 및 격납용기 살수펌프의 흡입유로를 형성한다. 보조건물 내에 설치되어 있으며 주제어실에서 조작된다.

자동 동작기능이 없는 이 밸브는 정상 대기상태에서 열린 위치를 유지하며 재순환 작동신호가 발생하여 공학적안전설비계통의 흡입유로를 격납용기 재순환집수조로 바꾸게 될 경우에도 운전원의 판단하여 조작 스위치를 이용하여 격리한다. 전원상실, 전동기 과부하 또는 밸브가 완전히 열려있지 않으면 운전 불가능상태 표시등이 점등된다.

격납용기살수계통에는 운전원이 계통의 운전상태를 감시하고 기기의 오동작을 확인할 수 있도록 계측제어 설비가 설치되어 있다. 모든 안전성 관련 계측제어설비는 독립적이고 다중으로 구성된 비상 소내전력계통으로부터 전원을 공급받는다.

계통 운전상태를 감시하고 주기적 시험이 용이하도록 유량지시계가 주제어실에 설치되어 있다.

<표 4-17> 격납용기살수계통 기기 규격

격납용기 살수펌프		
수량	2대(1대/계열)	
형식	수직 원심형	
재질	스테인레스강	
유량	4,240gpm (16,048 L/m) * 주입모드 시 RWST로의 순환유량 500gpm 포함	
전 양정	530ft (161.6m)	
요구 유효흡입수두	19ft (5.8m)	
살수노즐		
주 노 즐	수량	230개/계열
	형식	중공 원추형
	재질	스테인레스강
	용량	15.2gpm (57.6 L/m)@설계기준압력
보 조 노 즐	수량	80개/계열
	형식	중공 원추형
	재질	스테인레스강
	용량	3gpm (11.4 L/m)@설계기준압력
원자로냉각재 순환계통 격납용기 살수 열교환기(2대)		
튜 브 측	유체	원자로냉각재
	설계압력	750psig (52.7kg/cm ²)
	설계온도	400°F (204.5℃)
	재질	스테인레스강
동 체 측	유체	기기냉각수
	설계압력	150psig (10.6kg/cm ²)
	설계온도	200°F (93.4℃)
	재질	탄소강

[핵심요약]

격납용기살수계통은 사고 시 격납용기 대기로부터 요오드 및 기타 방사성 물질을 제거하고, 가연성 기체의 국부적 침적을 방지하기 위해 격납용기 대기를 혼합시키며, 사고 후 격납용의 열에너지를 제거함으로써 온도와 압력을 감소시키는 기능을 한다.

격납용기살수계통은 화학 및 체적 제어계통의 핵연료재장전수탱크 및 격납용기 재순환집수조, 2대의 격납용기 살수펌프, 2대의 격납용기 살수 열교환기, 2개의 독립된 주 살수 및 보조 살수 모관, 배관, 계측장비들로 구성되어 있다. 격납용기살수펌프는 핵연료재장전수저장탱크 또는 격납용기 재순환집수조에서 취수하여 격납용기 살수 열교환기와 살수모관 및 각 살수노즐을 통하여 격납용기 대기로 살수용액을 방출하도록 되어 있다.

주 살수모관은 살수되는 물방울이 대기의 핵분열성물질을 흡수하는 시간을 최대화하고 증기와 공기가 대기에서 열적 평형을 이룰 수 있도록 하기 위하여 격납용기의 상부에 설치되며, 보조 살수모관은 환형지역(2차 차폐벽과 격납용기 외벽사이), 운전층 하부의 격실과 운전층 상부의 주 살수 노즐에 의해 살수된 영역의 대기혼합을 최대화할 수 있도록 운전층 하부의 120ft에서 140ft 사이에 설치되어 있다.

원자력교육원

제6절 보조급수계통

[학습목표]

1. 보조급수계통의 기능을 설명할 수 있다.
2. 보조급수계통의 설계기준을 설명할 수 있다.
3. 보조급수계통의 주요 구성기기를 설명할 수 있다.
4. 보조급수계통의 운전에 대하여 설명할 수 있다.

1. 개 요

보조급수계통은 주급수계통이 어떠한 가상사고로 인해 급수를 공급하지 못할 경우, 발전소 고온대기 유지와 정지냉각계통의 연결 시점까지의 원자로 냉각기간 동안에 증기발생기로 보조급수를 공급하여, 노심손상의 방지를 위해 원자로에서 열을 제거하는 주요 수단이다.

이러한 이유 때문에 보조급수계통은 원자로 안전기능 및 공학적안전설비로서 기여하게 된다.

보조급수계통은 2대의 모터구동 펌프와 2대의 터빈구동 펌프로 구성되어 있다. 각 펌프들의 흡입원은 복수저장탱크인데 만일 이 공급계통이 운전 불가능하게 되면 탈염수저장탱크나 원수저장탱크로부터 공급을 받는다.

2. 설계 기준

보조급수계통은 주급수 상실사고시 증기발생기에 충분한 냉각수를 공급하는 기능을 갖고 있다. 각각의 보조급수 부속계통은 해당 증기발생기에 급수를 공급할 수 있도록 배열되어 있고, 정지냉각계통이 운전 개시되는 온도까지 발전소를 안전하게 냉각시키기 위해 충분한 보조급수를 공급한다.

이러한 원자로 냉각 기간동안 1대 또는 2대의 증기발생기에 공급하여야 하는 총 보조급수 유량은 대기로 방출되는 증기량과 증기의 수축을 고려하여 300,000 gals(1,135.6 m³)이다.

보조급수계통은 흡입측으로부터 전동기구동 보조급수 차단밸브의 전단까지 내진범주 I, 품질그룹 C 이며, 전동기 구동 보조급수 차단밸브에서 후단의 역류방지밸브까지의 배관 및 밸브류는 품질그룹 B 이다.

발전소 비상운전시 보조급수펌프는 내진범주 I, 품질그룹 C 인 복수저장탱크(CST : Condensate Storage Tank)에서 흡입을 취하며, 복수저장탱크로 재순환 된다. 또한 보조급수계통은 내진범주 III, 품질그룹 D인 탈염수(Demineralized Water) 계통 및 원수(Raw Water) 계통에서도 급수를 공급받을 수 있도록 설계되었다.

3. 계통 설명

가. 개 요

보조급수계통은 독립된 2개의 부속계통으로 구성되며, 각 부속계통은 비상디젤발전기가 연결된 안전관련 모션에서 전원을 공급받는 전동기구동펌프와 주증기계통에서 공급되는 증기로 구동되는 터빈구동펌프로 구성된다.

각 부속계통은 해당되는 증기발생기에 급수를 공급할 수 있도록 설계되며, 보조급수 계통 내의 단일 고장(Single Failure)과 동시에 발생할 수 있는 주급수관 혹은 주증기관 파단사고시에도 건전한 증기발생기로 충분한 급수를 공급할 수 있도록 설계되었다.

보조급수계통은 발전소의 비상운전시 원자로냉각재계통을 냉각시키기 위해 증기발생기로 급수를 공급할 수 있도록 다양하고(Diverse) 다중적인(Redundant) 계통을 구성하고 있으며, 또한 본 계통 내 단일기기 고장과 동시에 발생할 수 있는 증기발생기 1개와 연결된 급수배관 가상파열을 가정하여 안전관련 기능을 수행할 수 있다.

최소 유량은 다음의 고장 운전상태를 가정하여 공급되도록 한다.

- 정상 급수상실
- 소외 전력의 공급 유무에 상관없이 발생할 수 있는 2차 계통의 부분(Minor) 배관 파단 혹은 밸브 파열사고와 보조급수계통에서의 가장 제한적인 단일고장 발생
- 소외 전력의 공급 유무에 상관없이 발생할 수 있는 증기발생기 튜브 파단과 보조급수계통에서의 가장 제한적인 단일고장 발생

- 소외 전력의 공급 유무에 상관없이 발생 가능한 2차 계통의 주(Major) 배관 파단과 보조급수계통에서의 가장 제한적인 단일고장 발생
- 소외 전원 및 소내 교류전원 상실을 유발시키는 모든 고장 발생
- 소외 전력의 공급 유무에 상관없이 발생 가능한 소형 냉각재상실사고(Small LOCA)와 보조급수계통에서의 가장 제한적인 단일고장 발생

과도 혹은 사고상태 기간동안 보조급수계통은 다음과 같이 최소한 요구되는 급수 유량을 공급할 수 있도록 설계되었다.

(1) 2차측 배관과열 미 발생시

소외 전원상실 및 보조급수계통 내에서의 최악의 단일고장을 가정하여, 단일 증기발생기에 연속적으로 공급되어야 할 총 보조급수 유량은 증기발생기 압력이 1,270 psia(89.3 kg/cm²a)일 때 500 gpm(1.89 m³/min) 이상이며, 양쪽 증기발생기에서 보조급수를 요구하는 경우의 총 보조급수 유량도 상기와 동일하다.

단일 증기발생기에 공급되어야 할 최대 보조급수 유량은 증기발생기 압력이 1,270psia(89.3kg/cm²a)일 때 800gpm(3.03m³/min)이다.

(2) 2차측 배관 파단 발생시

손상되지 않은 증기발생기에 공급되어야 할 최소 유량은 증기발생기 압력이 1,270 psia(89.3 kg/cm²a)에서 500 gpm(1.89 m³/min) 이상이다. 위의 사항은 소외 전력 상실과 보조급수 계통 내의 최악의 단일고장이 일어났을 때를 가정한 것이다. 단일 증기발생기에 공급되어야 할 최대 유량은 보조급수계통(증기발생기 압력은 파단 지점에 따라 대기압 혹은 격납용기 압력임)의 최대 토출(Runout Flow) 상태에서 800 gpm(3.03 m³/min) 이하이다.

사고 발생시 보조급수계통은 보조급수 작동신호(AFAS)에 의하여 자동으로 기동되며, 또한 수동작동 수단도 구비되어 있다.

보조급수 작동신호 1(ASFAS-1)의 작동회로는 증기발생기 1에 속하며, 보조급수 작동신호 2(ASFAS-2)의 작동회로는 증기발생기 2에 속한다.

정상운전시 보조급수펌프는 복수저장탱크에서 급수를 공급받을 수 있도록 배열되어 있다.

보조급수계통은 소외 전력 유무에 관계없이 보조급수 작동신호를 받으면 45초 이내에 증기발생기에 자동으로 급수를 공급한다.

보조급수계통은 :

- 손상되지 않은 증기발생기에는 보조급수 작동신호가 제거된 후 15초 이내에 자동적으로 보조급수 공급이 차단되고,
- 증기발생기가 손상된 것으로 확인되었을 시는 30분 이내에 운전원에 의하여 수동으로 손상된 증기발생기에 보조급수 공급을 차단시킨다.

원자로에서 발생한 열은 증기발생기에서 급수를 비등시키고, 주증기 대기방출밸브(MSADV)를 통하여 대기로 방출시킴으로써 제거된다. 주 복수기가 이용 가능하면 터빈우회 계통(Turbine Bypass System)에 의하여 복수기로 증기를 방출시킬 수 있다. 원자로냉각재 온도 및 압력이 각각 350 °F (177 °C)/ 410 psia(28.8 kg/cm²a)로 떨어지면, 정지냉각 계통으로 냉각기능이 전환된다.

보조급수 계통은 발전소의 정상 기동 및 정지시에는 사용되지 않는다. 따라서 보조급수 계통은 중 에너지(Moderate Energy) 배관계통으로 분류된다.

보조급수펌프 터빈에 공급되는 구동용 증기는 주증기 계통의 주증기 격리밸브(MSIV) 전단에 있는 주증기 배관에서 취한다. 보조급수펌프 터빈은 증기 구동, 수평 2단의 비응축성 기기이다.

주제어실과 원격정지제어반에는 보조급수 차단밸브(V043/044/045/046) 및 보조급수 조절밸브(V035/036/037/038)용 제어스위치가 있으며, 각 밸브들은 수동제어가 가능하다.

보조급수 조절밸브들은 닫힘/제어 모드가 있고, 제어모드로 있을 때는 보조급수 조절밸브는 관련 증기발생기의 수위 신호에 따라 제어되거나 닫혀진다. 밸브 위치지시계들은 주제어실과 원격정지제어반에 있다.

보조급수펌프 터빈의 베어링 오일 냉각기에 공급되는 냉각수는 터빈구동펌프로부터 공급되고 펌프 흡입구로 되돌아온다.

<표 4-16> 보조급수 펌프 사양

대 수	호기 당 4대
형 식	수평 : 전동기구동 2대, 터빈구동 2대
정격 용량(대당)	최소 토출량을 제외하고 550 gpm (2.08 m ³ /min)
실양정(근사치)	3,600 ft(1,097 m)
제동 마력	1,100 hp(820 kW)

나. 기기 설명

(1) 보조급수펌프

각 펌프에 대한 제어스위치가 주제어반 및 원격 정지반에 제공된다. 펌프는 펌프 흡입 압력 ‘저’에 의해 자동으로 정지된다.

펌프의 흡입 및 토출 압력 ‘저’에 대한 정보가 주제어반에 제공된다.

2 개의 Chromel-Constantan 열전대가 각 펌프의 베어링 온도 측정을 위해 제공된다. 비 구동부의 온도는 전산기에 의해 감시된다. 100Ω Platinum 저항온도 검출기가 펌프모터 고정자의 온도검출을 위해 제공된다.

압력 계기 및 전송기는 펌프의 토출 및 흡입 압력을 현장 및 원격 정지반에 지시한다. 펌프 흡입 압력이 낮을 때 펌프를 정지시키고, 경보를 발생시킬 수 있도록 압력 전송기가 각 펌프의 흡입 배관에 설치된다.

각 펌프에는 재순환 배관이 있어서 펌프의 최소 유량을 보장한다.

(2) 보조급수펌프 흡입밸브

보조급수펌프에 의한 정상 흡입은 복수저장탱크로부터 정상개방 수동밸브를 통하여 이루어지고, 보조 흡입은 순수저장탱크 혹은 원수저장탱크로부터 펌프쪽으로 연결된 정상폐쇄 수동밸브를 통해 이루어진다.

(3) 보조급수 차단밸브

각 밸브에 대해 제어스위치가 주제어실 및 원격 정지반에 한 개씩 제공된다. 각 밸브의 리미트 스위치들은 주제어실 및 원격 정지반에 밸브 위치를 나타내는 지시등을 동작시키기 위하여 사용된다.

(4) 보조급수 유량제어

유량 감지기, 지시기 및 전송기들이 각 보조급수 공급배관에 제공된다. 각 전송기는 유량신호를 주제어실 및 원격 정지반의 지시기로 전송한다. 두 개의 증기발생기로 유입되는 보조급수 유량은 주제어실 또는 원격 정지반에 있는 수동/자동 제어 스테이션(Station)에서 정상적으로 제어된다.

각 수동/자동 제어 스테이션의 증기발생기 수위제어기를 통해 자동으로 제어된다. 보조급수 조절밸브는 주제어실 및 원격 정지반에서 2중으로 제어된다. 조절밸브에 관련된 제어시스템의 고장시에는 밸브가 개방(Fail to Open)된다.

(5) 밸브의 역방향 누설검출 열전대

주급수 배관에서 보조급수 배관으로 누설되는 것을 검출하기 위해 열전대가 급수 접속부 부근의 보조급수 배관상에 설치되며, 열전대의 고온시 주제어반에 정보가 제공되어 운전원의 조치를 취하도록 한다. 이것은 보조급수펌프에 증기가 함유(Steam Binding)되어 있을 가능성을 운전원에게 경보해 주는 것이다.

(6) 다양한 동력원

보조급수계통은 전동기 구동펌프의 구동력을 공급하는 Class 1E 4.16 kV AC 전력계통 및 펌프의 기동과 제어를 위한 Class 1E 125V DC 전력계통과 계통 종속성을 가진다. 소외전원 상실사고시에는 비상전력공급계통(디젤발전기)으로부터 전동기구동 펌프의 동력원을 공급 받는다. 솔레노이드 구동 보조급수 조절밸브들은 Class 1E 125 V DC 전력계통으로부터 전달되는 전원을 PCS 캐비닛을 통해 공급받는다. 교류 및 직류를 이용하는 전동기구동 보조급수 차단밸브들은 각각 Class 1E 480V AC 모터 제어반 및 Class 1E 125 V DC 모션으로부터 공급받는다.

다. 계통 운전

보조급수계통은 정상적인 발전소 기동 및 정지 시에는 사용되지 않는다. 이 계통은 공학적안전설비(ESF)의 하나로서 보조급수 작동신호(AFAS)에 따라 증기발생기에 충분한 급수를 제공하여 원자로냉각재로부터 노심의 잔열을 제거하는 기능을 수행한다. 보조급수 작동신호는 다음 중에 어느 하나의 신호에 의해 발생된다.

- 증기발생기 저-수위

○ 수동 작동

보조급수작동신호가 발생하면, 전동기구동 및 터빈구동 보조급수펌프가 관련된 증기발생기로 배열되어 관련 배관을 통해 급수를 공급하기 시작하며, 복수저장탱크로의 재순환수는 정상개방 상태인 배관을 통하여 재순환 된다.

보조급수 조절밸브는 증기발생기 수위를 제어하기 위한 조절 운전모드로 되어 있다. 보조급수계통이 정상운전일 경우, 공급되어야 할 보조급수 유량은 증기발생기 압력이 1,270 psia(89.3 kg/cm²a) 일 때 500 gpm(1.89 m³/min) 이상이며, 최대 보조급수 유량은 증기발생기 압력이 1,270 psia(89.3kg/cm²a) 일 때 800 gpm(3.03m³/min) 이하이다.

보조급수의 온도는 복수저장탱크에 저장된 복수의 온도에 따라 40 °F(4.4 °C)에서 120 °F(48.9 °C)의 사이에서 유지된다. 증기발생기 수위는 보조급수 조절밸브의 동작에 의해 MOD-HIGH 수위와 MOD-LOW 수위 사이에서 안정화된다. 이러한 수위 제어는 사고가 종결될 때까지 계속된다.

보조급수 조절밸브는 정상시 개방상태이며, 솔레노이드 밸브의 구동력 상실과 같은 고장시 개방상태(Fail to Open)가 된다. 만약 보조급수 조절밸브가 고장 개방되어 제어가 불가능하게 되면 보조급수 차단밸브를 이용하여 사고가 종결될 때까지 증기발생기 수위를 제어한다.

원자력교육원

<표 4-17> AFAS-1에 의해 동작 개시되는 기기

기기명	상태
증기발생기 1 취출 차단밸브(V005/007)	폐쇄
보조급수 터빈(TA01B) 증기공급밸브(V110)	개방
보조급수 터빈(TA01B) 기동밸브(V010)	개방
보조급수 펌프(PP01A, 모터구동)	기동
보조급수 조절밸브 V035/036	폐쇄/조절
보조급수 차단밸브 V043/044	개방
디젤발전기 부하 순차기(DG 01A/01B)	기동
증기발생기 1 공정시료채취 격납건물 차단밸브, V031/033/035	폐쇄
증기발생기 1 1차측 시료채취 차단밸브, V257	폐쇄

<표 4-18> AFAS-2에 의해 동작 개시되는 기기

기기명	상태
증기발생기 2 취출 차단밸브(V006/008)	폐쇄
보조급수 터빈(TA01A) 증기공급밸브(V109)	개방
보조급수 터빈(TA01A) 기동밸브(V009)	개방
보조급수 펌프(PP02B, 모터구동)	기동
보조급수 조절밸브 V037/038	폐쇄/조절
보조급수 차단밸브 V045/046	개방
디젤발전기 부하 순차기(DG 01A/01B)	기동
증기발생기 2 공정시료채취 격납건물 차단밸브, V032/034/036	폐쇄
증기발생기 2 1차측 시료채취 차단밸브, V258	폐쇄

<표 4-19> 보조급수 작동신호(AFAS-1)

보조급수 작동신호(AFAS-1)			
작동신호	설정치	동시성	비고
증기발생기 1 저 수위	23.5%	2/4	WR
수 동	수동 스위치(PM03 PNL의 HS-106 A,B,C,D)	2/4	

<표 4-20> 보조급수 작동신호(AFAS-2)

보조급수 작동신호(AFAS-2)			
작동신호	설정치	동시성	비고
증기발생기 2 저 수위	23.5%	2/4	WR
수 동	수동 스위치(PM03 PNL의 HS-107 A,B,C,D)	2/4	

<표 4-21> 다중 보조급수 작동신호(DAFAS)

다중 보조급수 작동신호(DAFAS)			
작동신호	설정치	동시성	비고
증기발생기 저 수위	22.2%	2/4	WR
선택된 다중보호계통 채널 바이스테인블 정지		2/4	
Reset : 주증기 차단신호가 존재하지 않고, 보조급수 작동신호가 존재하지 않을 때 증기발생기 수위가 22.2%(2/4 CH)이거나 주증기 차단신호(MSIS)가 발생되면 자동 Reset될 것이다.			

4. 안전성 평가

보조급수펌프는 관련된 보조급수 작동신호에 의하여 기동된다. 2대의 전동기구동 펌프에는 비상디젤발전기로부터 비상전력이 된다. 전동기구동 밸브는 Class 1E의 AC 혹은 DC 전원이 공급된다. 나머지 2대의 보조급수펌프는 소내 및 소외 교류전원상실 시 보조급수를 공급할 수 있도록 증기터빈에 직접 연결되어 구동된다.

보조급수 작동신호는 관련된 증기발생기에 보조급수를 공급하기 위하여 보조급수 조절밸브(V035/036/037/038) 및 차단밸브(V043/044/045/046)를 정렬시킨다. 일단 증기발생기 수위가 회복되어, 보조급수 조절밸브와 차단밸브들이 닫히는 동안에 보조급수 펌프는 지속적으로 운전된다.

손상된 증기발생기로의 보조급수의 공급을 차단시키기 위해서는 운전원에 의하여 수동으로 손상된 증기발생기로 통하는 유로상에 설치된 보조급수 조절밸브와 차단밸브들 중에 하나씩을 각각 닫으면 된다.

각 증기발생기 공급 배관에는 캐비테이팅 벤츄리(Cavitating Venturi)가 설치되어 있어 보조급수 펌프가 감압된 증기발생기에 의해 최대 토출(Runout Flow) 상태가 되는 것을 방지하도록 되어 있다.

보조급수는 급수배관 중에서 하향유로 노즐(Downcomer Nozzle)들을 통해 공급된다. 따라서 증기발생기의 하향유로 급수배관은 가열되지 않은 보조급수 유입으로 인한 수격현상을 방지하도록 설계되었다.

5. 시험 및 검사

각 보조급수펌프나 방출 배관을 포함하여 격납건물 격리밸브 전단까지는 ASME Code Section III Class 3, 격납건물 격리밸브를 포함하여 잔여 배관에 대해서는 Class 2에 따라 수압시험을 한다. 터빈 구동기는 출하전에 성능 시험, 급속기동 시험, 과속정지 시험을 실시한다.

모든 보조급수계통의 기기는 조립 완료 후에 기능시험을 실시한다. 보조급수계통은 출력운전 중 운영기술지침서에 규정된 주기에 따라 정기적인 성능시험이 가능해야 한다. 시험기간 동안 보조급수 공급원(Backup Water Source)은 주급수계통 또는 증기발

생기를 오염시킬 수 있으므로 허용되지 않는다.

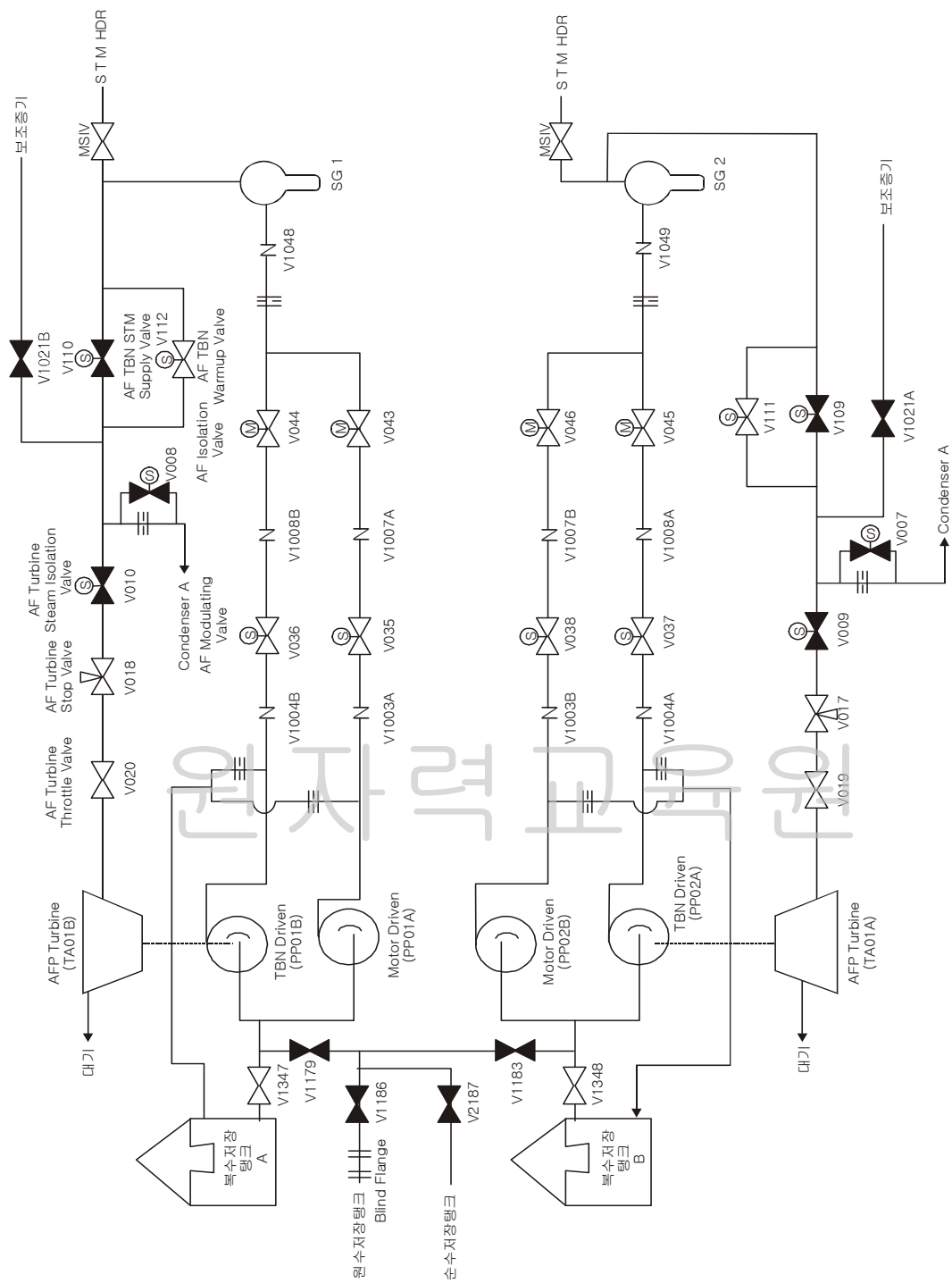
펌프의 가동중 시험은 복수저장탱크로의 재순환 및 유량 시험 배관을 통하여 이루어진다. 펌프의 성능을 관측하기 위하여 주제어실에는 토출 압력, 현장에서는 유량 지시계가 제공된다.

6. 계측설비

보조급수계통에 대한 계측 및 제어설비는 주제어실과 원격 정지반에 설치된다. 주 제어실 계측설비는 보조급수 유량, 온도, 펌프 흡입 및 토출 압력, 모터구동 펌프의 모터 전류, 증기발생기 수위, 모든 동력구동 밸브와 보조급수펌프의 상태 지시등을 겸한 제어용 수동조작 스위치 같은 감시설비를 포함한다.

펌프의 흡입과 토출부에서의 저압력, 공급 보조급수 고온, 비정상 펌프 진동 그리고 펌프 기동 실패에 대한 경보가 주제어실에 설치된다. 그리고 보조급수계통의 동작 불능 상태가 주제어실에 지시된다.

원자력교육원



[그림 4-45] 보조급수 계통

[핵심요약]

1. 보조급수계통 기능

- ○ 주급수 상실사고 시 노심의 잔열 제거를 위하여 증기발생기에 냉각수 공급
 - 정지냉각계통 운전 시점까지 보조급수 공급 및 공학적 안전설비로서 기여
- ○ 기동용 급수펌프 이용 불가 시 증기발생기 습식 보관을 위하여 보조급수 공급

2. 보조급수계통 설계기준

- ○ 정상급수 상실, 2차측 배관 파단, 증기발생기 Tube 파열, 소형 (원자로)냉각재상실사고(Small LOCA), 모든 소내외 전원 상실 시 노심의 잔열 제거를 위하여 증기발생기에 보조급수 공급

3. 보조급수계통 주요 구성기기

- 전동기 구동 보조급수펌프 및 터빈 구동 보조급수펌프
- 솔레노이드 구동 보조급수 조절밸브 및 전동기 구동 보조급수 차단밸브
- 캐비테이팅 벤츄리(Cavitating Venturi)
 - 감압된 증기발생기에 의한 최대토출 흐름(Runout Flow) 방지

4. 보조급수계통 운전

- 조급수 작동신호(AFAS) 발생 시 자동으로 증기발생기에 보조급수 공급
 - 정상 흡입원 : 복수저장탱크
 - 보조 흡입원 : 탈염수(순수)저장탱크 및 원수저장탱크
 - ※ 보조급수 작동신호(AFAS) : 증기발생기 저 수위 및 수동
 - ※ 보조급수는 증기발생기 하향유로 급수노즐을 통하여 공급
- 증기발생기 수위 제어
 - 솔레노이드 구동 보조급수 조절밸브 고장 개방(Fail to Open) 시 전동기 구동 보조급수 차단밸브 이용
- 소외전원 상실사고 시
 - 비상디젤발전기에서 자동으로 전동기 구동 보조급수펌프에 전원 공급
- 모든 소내외 전원 상실사고 시
 - 주증기 격리밸브 전단에서 터빈 구동 보조급수펌프에 주증기 공급

제5장 발전소 보호계통

제1절	발전소 보호계통	256
제2절	노심보호 연산기계통(CPCS)	277

원자력교육원

제1절 발전소 보호계통

[학습목표]

1. 발전소보호계통의 구성계통을 설명할 수 있다.
2. 원자로보호계통의 구성 및 기능을 설명할 수 있다.
3. 공학적안전설비작동계통의 구성 및 기능을 설명할 수 있다.
4. 다중보호계통의 구성 및 기능을 설명할 수 있다.

1. 개 요

발전소는 안정상태에서 출력운전이 수행되는 것이 가장 바람직하지만 항상 안정상태에서 운전되지는 않으며, 원자력발전소에는 여러 형태의 사건이 발생할 수 있는데 이러한 모든 사건들은 발전소 설계에 고려되어야 한다.

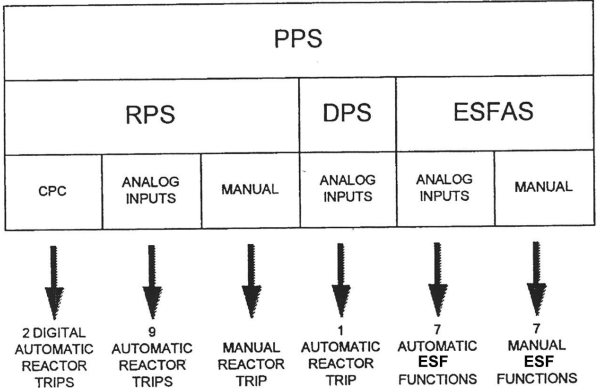
발전소 보호계통은 제한사고나 예상운전사건의 결과를 허용치 이내로 유지하기 위해 설계된 계통으로 안전관련 발전소 변수들(예 : 중성자속, 가압기 압력, 증기발생기 압력·수위)을 계속 감시하면서, 감시 변수들이 기 설정된 값에 도달되면 자동으로 보호기능이 동작되어, 노심 및 냉각재계통 압력경계의 건전성을 보장하고, 사고 시 소외 선량율이 10CFR 100에서 규정한 기준치를 초과하지 않도록 사고결과를 완화 또는 사고를 방지하게 한다. 감시 변수들이 보호동작을 일으키는 설정치에 접근하면 운전원에게 경보를 제공한다. 발전소보호계통은 원자로보호계통, 공학적안전설비 작동계통 및 다중보호계통으로 나뉘게 된다.([그림 5-1] 참조)

가. 원자로보호계통

원자로보호계통은 예상운전사건 시에 원자로 안전 제한치가 초과되는 것을 방지하기 위해 원자로를 신속하게 정지시키고, 사고 시에 공학적안전설비 작동계통을 보조하여 사고결과를 완화시킨다.

원자로보호계통은 측정 채널, 바이스테이블, 논리회로, 그리고 개시회로 등으로 구성된다. 바이스테이블은 공정변수(현장입력신호)가 설정치를 초과한 경우 정지신호를 발생하며 원자로 정지신호는 바이스테이블이 동시에 2개 이상 작동된 경우에 발생

되도록 논리회로가 구성되어 있다. 원자로정지신호는 원자로 정지차단기를 개방시킴으로써 제어봉구동장치 코일의 전원을 차단시키고 모든 제어봉집합체가 중력에 의해 노심으로 낙하되도록 한다.



[그림 5-1] 발전소보호계통 구성

나. 공학적안전설비 작동계통(ESFAS)

공학적안전설비 작동계통은 설계기준사고시 사고결과를 허용치 이내로 유지하기 위해 안전기기를 작동시키는 기능을 수행한다. 발전소 공정변수 값이 설정치에 도달하면, 안전주입 작동신호, 격납용기 격리작동신호, 격납용기 살수작동신호, 주증기 격리신호, 재순환 작동신호, 보조급수 작동신호가 발생된다.

공학적안전설비 작동신호는 공학적안전설비 작동계통 보조 릴레이(Relay) 캐비닛으로 전송되며 보조 릴레이 캐비닛은 2개의 트레인(Train)으로 구성된다. 각 트레인에는 트레인에 해당하는 펌프, 밸브들의 릴레이가 설치되어 있으며 한 트레인만 완전히 작동되어도 설계기준사고를 보호할 수 있는 충분한 용량을 갖고 있다.

2. 계통구성 및 기능

가. 원자로보호계통

(1) 원자로 정지신호 배경

원자로정지 설정치는 원자로 노심과 냉각재계통의 정상운전 및 설계기준사고

동안 안전제한치를 초과하는 것을 방지하도록 설정되었고, 공학적안전설비 작동계통이 동작되는 중대사고 결과를 완화하는데 기여하도록 설계되어 있다. 저-핵비등이탈율과 고-국부출력밀도는 각각 안전제한치 1.3과 21 kW/ft에 근거한 설정치이며, 정지설정치는 노심보호연산기에 의해 디지털 신호 형태로 발생된다.

(2) 원자로 정지신호

<표 5-22> 원자로 정지신호(1/2)

번호	원자로 정지신호	동시성	설 정 치	목 적
1	가압기 고압력	2/4	167.5 kg/cm ² a(2,385 psia)	원자로냉각재계통 과압 방지
2	가압기 저압력	2/4	123.8kg/cm ² a(1,760psia) ~ 7.0 kg/cm ² a(100 psia)에서 가변, STEP : 28.1kg/cm ² a	DNB방지(28.1 kg/cm ² a 이하에서 수동우회 가능, 35 kg/cm ² a 이상에서 자동우회해제)
3	증기발생기 저수위	2/4	43%(WR)	2차측 열제거원 상실 시 원자로냉각재계통 과압 방지
4	증기발생기 고수위	2/4	93%(NR)	증기발생기 습분방출로 인한 터빈손상 방지
5	증기발생기 저압력	2/4	62.3 kg/cm ² a(885.5psia) ~ 0 kg/cm ² a(0psia)에서 가변, STEP : 14.1kg/cm ² a	주증기관 파단에 따른 원자로냉각재계통 과압 방지
6	격납건물 고압력	2/4	133.0 cmH ₂ O(1.9 psig)	격납건물 설계압력 초과 방지

<표 5-1> 원자로 정지신호(2/2)

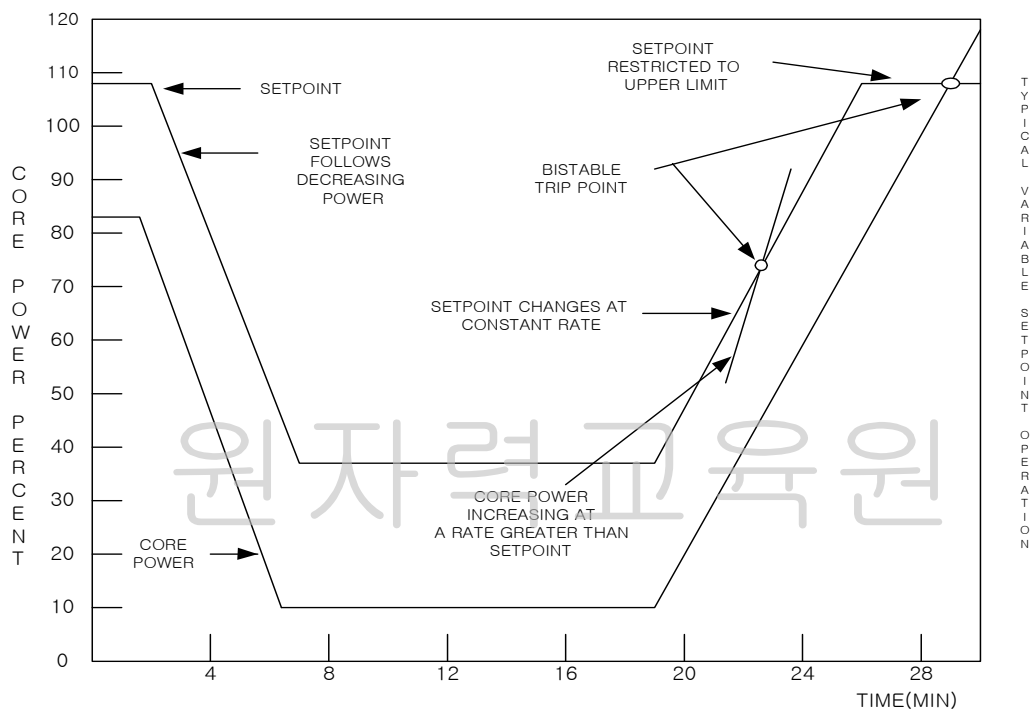
번호	원자로 정지신호	동시성	설정치	비고
7	원자로 냉각재 저유량(Rate)	2/4	2.1 cmH ₂ O/Sec	DNB 방지
	원자로 냉각재 저유량(Floor)	2/4	737.1 cmH ₂ O	
	원자로 냉각재 저유량(Band)	2/4	640.5 cmH ₂ O	
8	고-국부출력밀도	2/4	21.0 kW/ft	국부출력밀도가 연료설계 제한치 초과방지 (10 ⁻⁴ % 이하에서 우회가능)
9	저-핵비등이탈률	2/4	1.30	핵비등이탈율이 연료설계 제한치 초과방지(10 ⁻⁴ % 이 하에서 우회가능)
10	가변 과출력 (Ceiling)	2/4	정격출력의 109.4%	2차측 사고, 제어봉 이탈사 고에 따른 반응도 증가로 인한 노심손상 방지
	가변 과출력 (Rate)	2/4	14.6 %/min	
	가변 과출력 (Band)	2/4	13.6%	
11	고-대수출력준위 (가동 및 운전 중)	2/4	정격출력의 0.018 %Power	출력폭주방지(정격출력의 10 ⁻³ % 이하에서 우회가능)
12	고-대수출력준위 (정지)	2/4	정격출력의 0.018 %Power	정지 중 원자로 임계 방지
13	가압기 고압력 (다중보호계통)	2/4	169.8 kg/cm ² a (2,415 psia)	중복 보호기능
14	수동 정지	2/4	N/A	중복 보호기능

(가) 수동 원자로 정지

수동 원자로 정지는 자동 보호 채널에 대한 중복 보호 기능을 제공한다.

(나) 가변 과출력 정지

가변 과출력 정지는 반응도 폭주로 인한 노심손상을 방지한다. 정지신호는 원자로 중성자속 출력이 프로그램 설정값(14.6 %/min) 이상으로 증가하거나, 기 설정된 최대값(109.4%)에 도달하게 되면 발생되며, 입력신호는 노외중성자속감시계통 안전 채널의 선형출력이다.



[그림 5-2 가변 과출력

(다) 고-대수출력준위

고-대수출력준위 정지는 정지상태에서 계획되지 않은 임계사고로 인한 핵연료 피복재의 건전성을 확보한다. 정지신호는 지시된 중성자속 출력이 기 설정된 최대치(0.018%)에 도달할 때 발생되며, 출력이 $10^{-3}\%$ 이상되면 운전원에 의한 수동 우

회가 가능하고 $10^{-3}\%$ 이하로 떨어지면 자동으로 원상 복귀된다.

(라) 고-국부출력밀도

고-국부출력밀도 정지는 설계기준 예상운전사건 발생 시 국부출력밀도(kW/ft)가 연료설계 제한치를 초과하지 않도록 한다. 고-국부출력밀도 정지는 출력 $10^{-4}\%$ 이하에서 수동우회 할 수 있으며, $10^{-4}\%$ 이상이 되면 우회기능은 자동 제거된다. 국부출력 밀도는 다음의 정보를 활용하여 노심보호연산기에서 계산한다.

- 노외중성자속 감시계통으로부터 원자로출력과 축방향 출력분포
- 제어봉집합체 위치측정으로부터 반경방향 침투계수
- 원자로냉각재 온도와 원자로냉각재 유량으로부터 ΔT 출력

(마) 저-핵비등이탈율(DNBR Low)

저-핵비등이탈율 정지는 설계기준 예상운전사건 시 핵비등이탈율이 연료설계 제한치를 초과하는 것을 방지한다. 이 정지신호는 $130.8\text{kg/cm}^2\text{a}$ (1860 psia)의 가압기 저압력 근거에 반영되어 있으며 이 압력 도달 시 저 핵비등이탈율 정지는 자동으로 발생한다. 저-핵비등이탈율 정지는 출력 $10^{-4}\%$ 이하에서 수동우회 할 수 있고 $10^{-4}\%$ 이상이 되면 우회기능은 자동 제거된다.

핵비등이탈율은 노심보호연산기에서 계산되며, 노심 평균출력, 냉각재 저온관 온도, 원자로냉각재 압력 및 유량, 노심 출력분포, 제어봉집합체 위치측정계통에 의한 반경방향 침투계수 등이 입력신호로 사용된다.

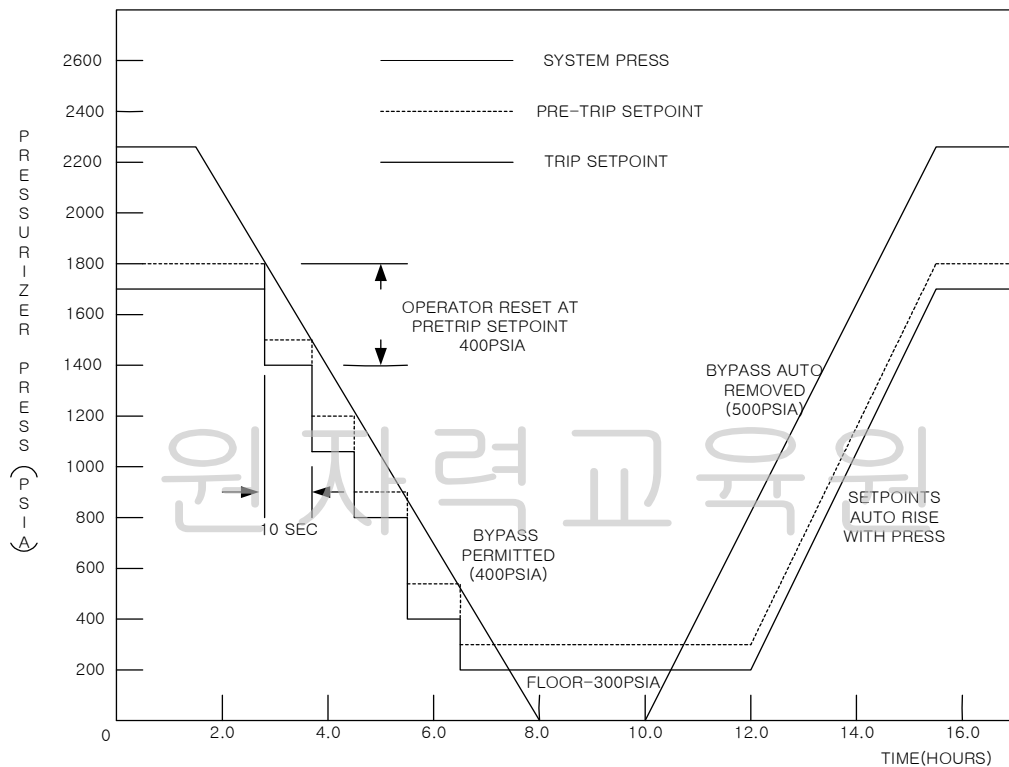
(바) 가압기 고압력

가압기 고압력 정지는 가압기 안전 밸브, 주증기 안전밸브와 함께 부하 상실 사고시 원자로냉각재의 과압에 대한 보호기능을 제공한다. 정지 설정치는 가압기 안전 밸브의 설정치보다 낮게 함으로써 가압기 안전밸브의 바람직하지 않은 동작을 최소화 하며 입력신호는 협역 가압기 압력신호이다.

(사) 가압기 저압력

가압기 저압력 정지는 원자로냉각재 재고량 감소 사고 및 2차 계통에 의한 과도한 냉각 사고 시 원자로를 정지시키고 공학적안전설비 동작계통을 보조한다.

발전소 정지·냉각 시 운전원이 수동으로 정지 설정치를 감소할 수 있다. 정지 설정치는 100 psia까지 수동으로 감소시킬 수 있고, 리셋 후 10초 이내에는 다시 리셋 할 수 없다. 설정치는 압력증가 시 가압기 압력과 설정치 차이를 400 psia 유지한 채 $123.9\text{kg/cm}^2\text{a}$ (1762 psia)까지 자동적으로 증가한다. 가압기 압력이 400 psia 보다 적으면 가압기 저압력에 의한 정지를 수동으로 우회할 수 있으며, 가압기 압력이 500 psia 이상으로 증가되면 자동으로 복귀된다. 입력신호는 광역 가압기 압력신호이다.



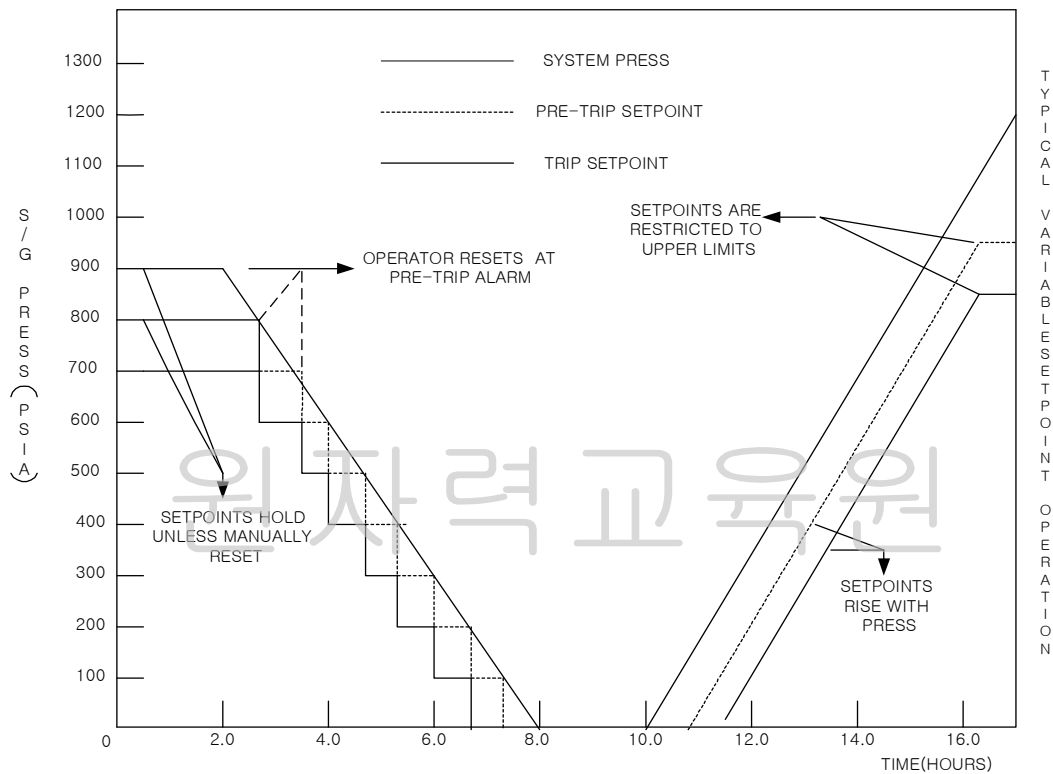
[그림 5-3] 가압기 저압력 정지 가변 설정치

(아) 격납건물 고압력

격납건물 고압력 정지는 격납건물 내에서 배관파열 시 격납건물 압력이 설계 압력을 넘지 못하도록 공학적안전설비 작동계통과 함께 보호기능을 제공한다. 정지 설정치는 안전주입 설정치와 동일하며 입력신호는 격납용기 압력이다.

(자) 증기발생기 저압력

증기발생기 저압력 정지는 2차계통에 의한 열 제거 증가사고 시 원자로 냉각재의 과냉 사고를 방지한다. 발전소 정지·냉각운전 기간에 증기발생기 압력이 낮아지면 여기에 맞추어 정지 설정치를 수동으로 감소시킬 수 있다. 한번 리셋 버튼을 누를 때마다 정지 설정치가 200 psi씩 감소하며 대기압까지 감소시킬 수 있어 정지 우회가 필요 없다. 정상압력으로 증가 시 설정치는 증기발생기 압력과 200 psi의 차이를 가지고 자동으로 정지 설정치에 도달할 때까지 증가한다.



[그림 5-4] 증기발생기 저압력 정지 가변설정치

(차) 증기발생기 저수위

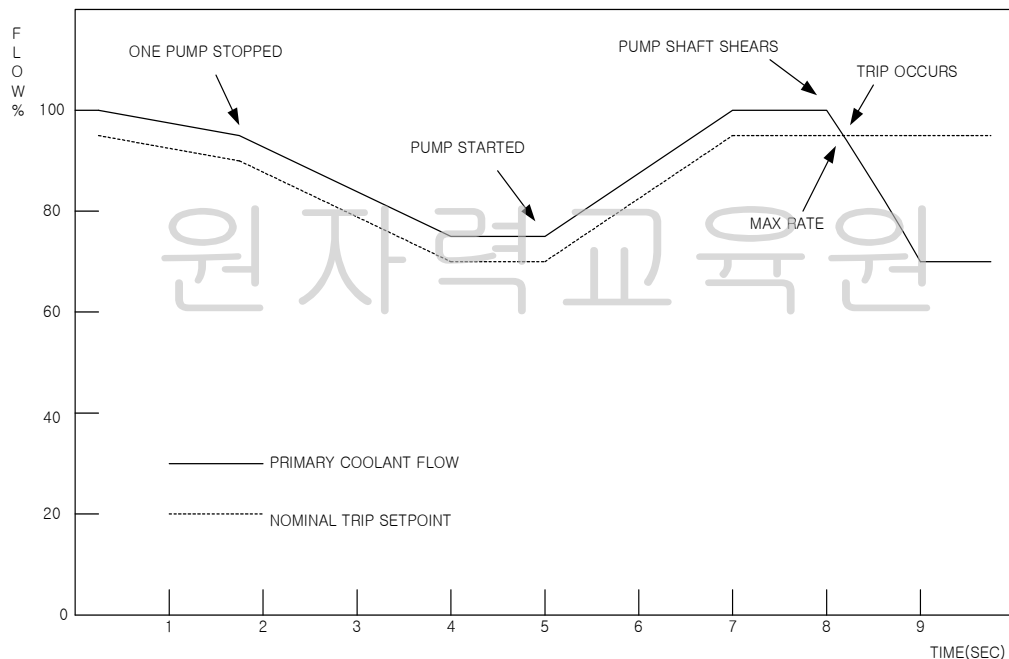
증기발생기 저수위 정지는 급수유량 상실사고에 대한 보호기능을 제공하고, 2차계통의 열 제거감소 때문에 원자로냉각재계통이 설계 압력을 초과하지 않음을 보증한다. 입력신호는 광역 증기발생기 수위이다.

(카) 증기발생기 고수위

증기발생기 고수위 정지는 증기의 과다한 습분 동반으로부터 터빈 보호를 제공하는 기능을 한다. 원자로가 정지되면, 터빈은 자동으로 정지된다. 증기발생기 고수위 정지는 기기 자체만을 보호하기 때문에 안전분석에는 적용하지 않으며 입력신호는 협역 증기발생기 수위이다.

(타) 원자로냉각재 저유량

원자로냉각재 저유량 정지는 원자로냉각재펌프 축 전단사고, 소외 전원 상실과 동시에 증기관 파열사고 시 4대의 냉각재펌프 유량 저하로 인한 핵비등 이탈(DNB)을 방지한다. 유량은 증기발생기 1차측 전·후단 압력차를 이용하여 측정하며 이 압력차가 큰 비율로 떨어지거나 어떤 설정치(최소치)이하로 떨어질 때 원자로 정지가 발생한다.



[그림 5-5] 원자로냉각재 저유량 정지 가변설정치

(파) 가압기 고압력(다중보호계통)

다중보호계통은 원자로보호계통과는 별도로 가압기 압력이 원자로정지 설정

치를 초과하는 경우 원자로를 정지시킨다. 다중보호계통의 가압기 고압력 설정치는 원자로보호계통의 설정치보다 높게 설정된다.

(하) 수동 원자로 정지스위치

주제어실 전면에 설치된 4개의 수동 원자로 정지 버튼은 필요시 수동으로 원자로를 정지시킬 수 있는 누름 스위치로서 선택적 2/4 논리에 의해 원자로 정지를 시킨다.

(3) 계통구성

(가) 바이스테이블 및 바이스테이블 출력계전기

각 아날로그 입력신호(현장 신호)는 바이스테이블로 전송되어 기 설정된 고정 또는 가변 설정치와 비교되며 입력된 신호값이 설정치에 도달하면, 바이스테이블 출력 신호는 “1”에서 “0”으로 전환되어 관련 바이스테이블 출력계전기를 비 여자시킨다. 노심보호연산기가 원자로 정지신호를 발생하는 경우는 외부접점이 관련 바이스테이블 출력계전기를 비 여자시킨다.

1) 고정 설정치 바이스테이블

설정치가 고정되어 있고 설정치는 발전소보호계통 캐비닛에서 수정 가능하다.

2) 단방향 가변 설정치 바이스테이블

누름 버튼을 사용하여 수동으로 설정치를 감소시킬 수 있으며, 기 입력되어 있는 양만큼 설정치가 감소된다. 그러나 아날로그 입력신호(현장신호)가 증가하면 설정치도 자동 증가한다. 가변 설정치는 가압기 저압력, 증기발생기 저압력 바이스테이블에 적용되며 계통압력이 감소하여 예비정지(Pre-trip) 설정치에 도달하면 운전원은 리셋 누름 버튼을 이용하여 수동으로 정지 설정치를 감소시킬 수 있다. 리셋 누름 버튼은 주제어실, 발전소보호계통의 운전원 모듈, 발전소 보호계통 캐비닛, 원격정지패널에 있고 리셋 회로에는 시간지연회로가 있어 일정한 시간이 지난 후에 리셋 기능이 작동된다.

3) 비율 가변 설정치 바이스테이블

가변 과출력 원자로정지 및 원자로냉각재 저유량 정지신호에 적용된다. 발전소 출력이 증가되면 비율 가변 설정치는 설정된 비율에 따라 자동으로 증가되어 기

설정된 여유도를 갖게 되며, 현장신호가 설정치를 초과하면 바이스테이블 정지가 발생된다.

(나) 논리 조합(Logic Matrix)

바이스테이블 정지는 관련된 바이스테이블 출력계전기를 비여자시키고, 4개의 보호채널을 이용하여 2채널 조합을 만들면 AB, AC, AD, BC, BD, CD의 6개 논리조합이 형성된다.

(다) 조합 계전기(Matrix Relay)

바이스테이블 출력계전기처럼 조합계전기도 2개 이상 측정 채널의 바이스테이블이 정지 설정치에 도달하면 비여자된다. 원자로보호계통 캐비닛에서 조합계전기의 상태(여자 또는 비여자)를 알 수 있으며, 4개 중 하나의 조합계전기는 하나의 개시회로로 접점으로 사용된다.

(라) 개시 회로(Initiation Circuit)

각 개시회로에는 직렬로 된 6개의 접점이 있고, 한 개의 개시계전기가 있다. 어떤 조합이든 2개의 정지 바이스테이블이 작동되면 조합계전기가 비여자되어 개시회로의 해당 접점이 개방되고, 4개의 개시계전기가 비여자되며, 이것은 해당 원자로정지 차단기를 개방한다.

(마) 최종 작동 논리회로

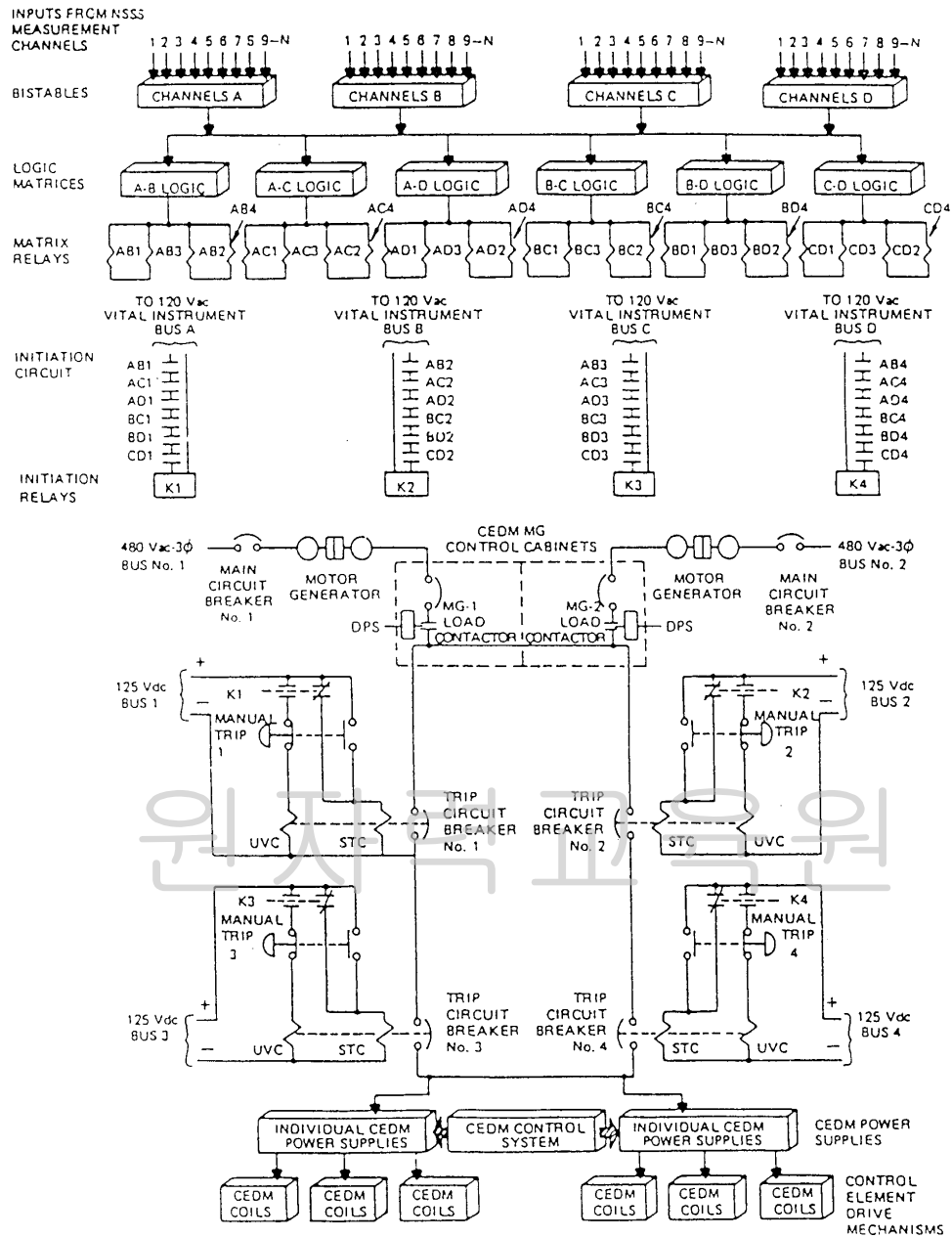
원자로 보호계통의 최종 작동 논리는 제어봉구동장치의 전원 공급 회로에 있는 원자로 정지차단기계통이다. 개시계전기는 각각의 계전기에 연결된 원자로정지 차단기 접점을 개방시킨다.

나. 공학적 안전설비 작동계통

(1) 공학적안전설비 작동신호

(가) 안전주입 작동신호(SIAS : Safety Injection Actuation Signal)

안전주입작동신호는 원자로냉각재계통에 봉산수를 주입하여, 정지여유도를 확보하고 연료 손상을 최소화한다. 가압기 저압력(1800psia), 격납건물 고압력(133 cmH₂O) 시에 발생하는데 두 입력신호는 원자로보호계통과 공유된다.



- NOTES.
1. STC = SHUNT TRIP COIL
 2. UVC = UNDER VOLTAGE COIL
 3. DPS = DIVERSE PROTECTION SYSTEM

[그림 5-6] 발전소보호계통 2/4 논리조합(Matrix)

(나) 격납건물 격리작동신호(CIAS : Containment Isolation Actuation Signal)

격납건물격리작동신호는 냉각재 상실사고 또는 주 증기관 파열시에 격납건물을 통과하는 배관을 차단하여 방사성 물질의 외부 노출을 방지한다. 가압기 저압력(1800psia), 격납건물 고압력(133cmH₂O)시에 발생한다.

(다) 격납건물 살수작동신호(CSAS : Containment Spray Actuation Signal)

격납건물살수작동신호는 냉각재 상실사고 및 주 증기관 파열시에 하이드라진과 붕산수의 혼합물을 격납건물 대기에 살수하여 열과 방사성 옥소를 제거하는 기능을 한다. 격납건물살수로 인한 열 제거는 격납건물 온도와 압력을 설계값 이하로 유지되도록 한다 .

(라) 재순환 작동신호(RAS : Recirculation Actuation Signal)

재순환 작동신호는 안전주입계통이 동작한 사고 후 장기 노심 냉각을 위해 격납건물 집수조로부터 붕산수를 재순환시키는 기능을 하며 재장전수탱크(RWT) 저수위(7.6%) 시 발생한다.

(마) 주증기 격리신호(MSIS : Main Steam Isolation Signal)

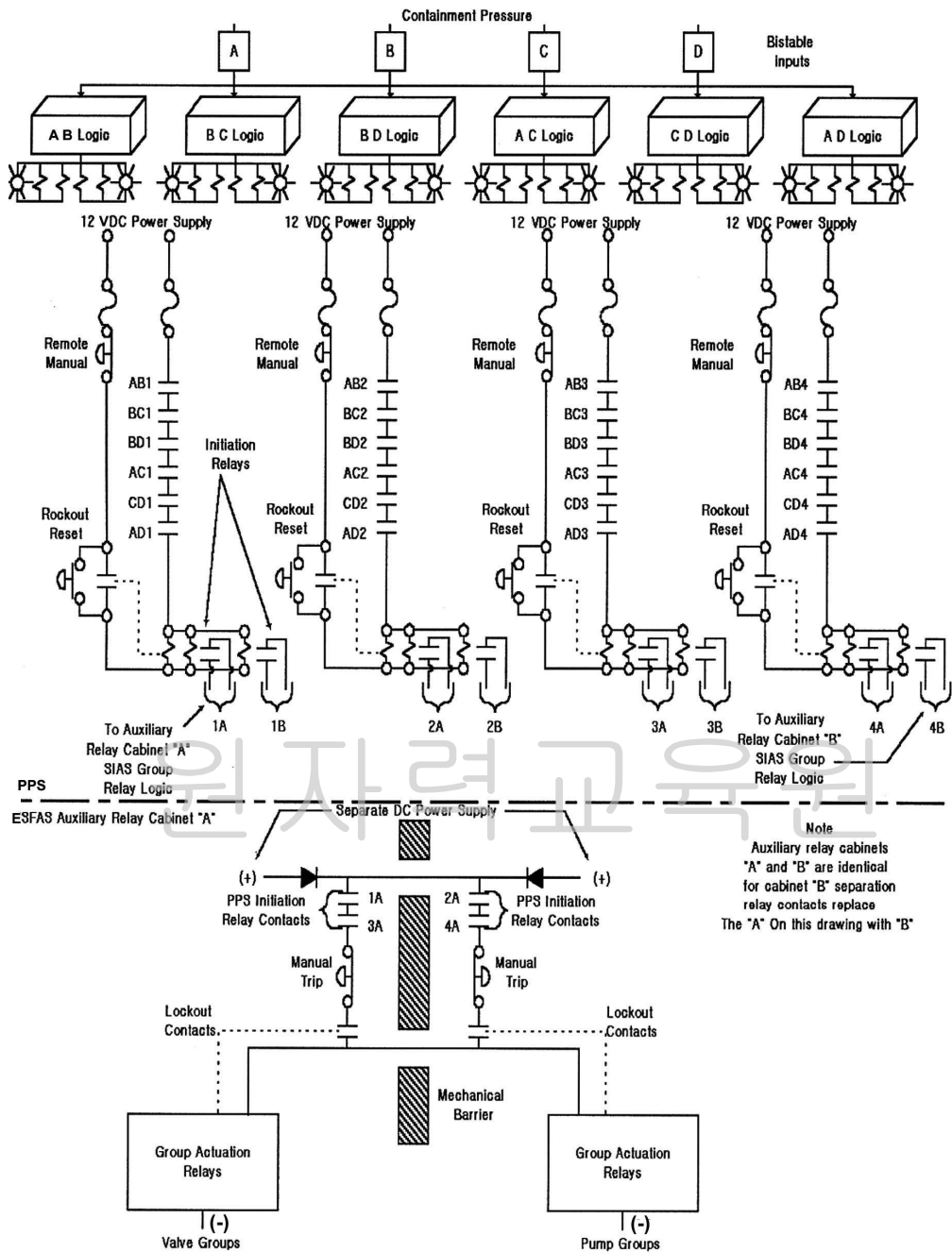
주증기 격리신호는 주증기관 파열 시 격납건물의 에너지 방출과 계통 과압을 방지하며, 증기발생기 취출수계통을 격리하여 노심의 열제거원 상실을 방지한다. 증기발생기 고수위, 증기발생기 저압력, 격납건물 고압력 시에 발생한다.

(바) 보조급수 작동신호(AFAS : Auxiliary Feedwater Actuation Signal)

보조급수작동신호는 증기관 파열사고 또는 급수 상실사고 시 증기발생기로 보조급수를 공급한다. 각 증기발생기 마다 별도의 보조급수작동신호가 만들어지며 광역증기발생기 수위가 23.5 % 이하이면 보조급수작동신호가 발생한다.

(사) 기타

연료건물 비상배기 작동신호(FBEVAS), 격납용기 퍼지격리 작동신호(CPIAS), 주제어실 비상배기 작동신호(CREVAS)가 있다.



[그림 5-7] 공학적안전설비작동계통 신호흐름도

(2) 회로 구성

원자로보호계통과 거의 동일하나 2개의 트레인으로 구성된 공학적안전설비의 작동신호에 똑같은 개시회로가 사용되므로 개시회로에는 2개의 개시계전기가 있다.

각 개시회로에는 폐쇄계전기가 개시계전기와 병렬로 연결되어 있어 한번 개시회로가 비 여자되면 폐쇄계전기가 리셋 될 때까지 계속 동작상태를 유지하는데 이는 보조급수작동신호를 제외한 모든 공학적안전설비 작동계통에서 작동된 기기들은 작동 원인이 사라진 후에도 사고 후 상태로 계속 유지된다.

3. 경보 및 기타 연동신호

가. 경보

발전소보호계통은 경보계통으로 바이스테이블 예비정지, 바이스테이블 정지, 정지 우회, 바이스테이블 우회, 전원공급기 고장, 시험 상태 등의 경보신호를 전송하고, 바이스테이블 정지신호는 사건순서(SOE) 기록을 위해 발전소자료수집계통을 경유하여 발전소감시계통으로 입력된다.

나. 제어봉인출금지 신호

가압기 고압력 예비정지 또는 노심보호연산기에서 다음의 경우에 제어봉제어계통으로 제어봉인출금지 신호를 전송한다.

- 저-핵비등이탈률 예비정지 또는 고-국부출력밀도 예비정지 신호발생
- 원자로 출력 급감발(RPCS) 시
- 설정치를 초과하는 제어봉 집합체 부 그룹 내의 편차 발생
- 제어봉 구동순서 불량(CEA Out of Sequence) 및 부 그룹간의 편차신호 발생

다. 발전소보호계통 정지우회

발전소의 기동·정지 또는 저 출력 운전시험을 위해 발전소보호계통 정지우회가 필요하고, 주제어실의 발전소보호계통 운전원 모듈과 경보패널에 모든 정지우회상태가 표시된다.

(1) 가압기 저압력 정지우회

가압기 저압력 정지우회는 저출력과 냉각재 저온상태에서 계통시험, 가열·냉각 운전 시 필요하며 우회 기능은 각 보호계통마다 수동으로 수행하고, 가압기 압력이 설정치보다 크게 되면 우회기능은 자동으로 제거된다. 수동 우회스위치는 발전소보호계통 캐비닛, 주제어실 발전소보호계통 운전원 모듈 및 원격정지 패널에 있다.

(2) 고-대수 출력준위 정지우회

고-대수 출력준위 정지우회는 원자로 기동 시에 원자로가 출력영역으로 진입하는 것을 가능케 하고, 원자로 출력이 $10^{-3}\%$ 이상에서는 운전원이 각 보호채널마다 수동으로 정지우회를 수행한다.

(3) 핵비등이탈률/국부 출력밀도 우회

원자로 출력이 $10^{-4}\%$ 이하로 감소하면 더 이상 핵비등이탈률/국부 출력밀도 정지가 필요하지 않다. 저출력 준위에서 노심보호연산기의 계산착오에 의한 원자로정지 가능성을 방지하기 위해 원자로 출력 $10^{-4}\%$ 이하에서 운전원이 노심보호연산기 운전원모듈에서 수동으로 정지우회를 수행한다.

(4) 노심보호연산기 제어봉인출금지 우회

제어봉인출금지 우회는 원자로 출력이 $10^{-4}\%$ 이하가 되면 자동으로 우회되며, 원자로 출력이 $10^{-4}\%$ 이상이 되면 우회기능은 자동으로 제거된다. 제어봉인출금지 우회 상태인 경우에도 가압기 고압력 예비정지 2/4 논리조건이 발생하면 제어봉 제어계통으로 제어봉인출금지 신호를 보낸다.

(5) 바이스테이블 정지채널 우회

바이스테이블 정지채널 우회를 선택하면 바이스테이블에 의한 채널정지 기능이 제거된다. 한 채널이 우회되면 자동적으로 발전소보호계통 보호 논리는 2/3 동시논리 조건으로 바뀌며 한번에 한 채널만 우회가 가능하다.

라. 연동신호

(1) 정지채널 우회

정지채널 우회연동은 운전원이 동일 변수의 정지채널 우회를 동시에 2채널 이

상 불가능하게 한다.

(2) 수동 시험 연동

계통 시험동안에 전기적인 연동은 6개의 논리조합 계전기 모듈에서 한 모듈의 계전기만 시험을 가능하게 한다.

(3) 노심보호연산기 시험 연동

저-핵비등이탈률과 고-국부출력밀도 채널정지는 노심보호연산기 시험 중에 반드시 우회되도록 연동되어 있다.

4. 다중보호계통

가. 개요

다중보호계통은 0% 출력 상태에서 제어봉 인출, 부분 냉각재 유량상실, 부하 상실, 완전 급수상실, 제어 불가능한 붕산회석, 잉여부하, 1차측 시료누설과 같은 원자로 정지불능 예상과도상태사건(Anticipated Transient Without Scram)의 위험을 줄이기 위한 요건에 의해 설계되며, 발전소 보호계통이 작동하여 원자로가 정지되지 않는 예상운전사고(Anticipated Operational Occurrence) 시에 보호신호를 발생시킨다. 다중보호계통은 전송기에서 제어봉의 전원을 차단하는 최종 출력까지 발전소 보호계통과 물리적·전기적으로 분리 설계되며, 다중성 개념으로 설계된 비안전계통으로 발전소보호계통과 중복되어 원자로/터빈을 정지시키고, 보조급수계통을 기동하여 예상과도상태사건 사고 발생시 그 위험을 경감시킨다.

나. 계통 설명

다중보호계통은 발전소보호계통과 중복되어 원자로 정지/터빈 정지 및 보조급수계통 기동신호를 발생하여 발전소보호계통을 보강한다. 다중보호계통은 공통유형고장을 줄이기 위해 원자로보호계통 기기와는 다른 기기를 사용하고, 발전소보호계통의 기능상실 시에도 원자로정지를 시킬 수 있도록 설계된다. 물리적·전기적으로 완전히 격리된 채널이 두 개 있으며, 2/2 논리회로를 이용하여 제어봉구동장치 전동기/발전기 세트(M-G Set) 출력접점을 개방함으로써 동작된다.

다중보호계통은 가압기 압력이 설정치 이상인 경우, 터빈이 정지되었을 때, 수동 조작에 의해 원자로 정지신호를 발생시키고, 증기발생기 수위가 설정치 이하로 떨어지면 보조급수계통 작동신호를 발생시킨다.

(1) 원자로 정지

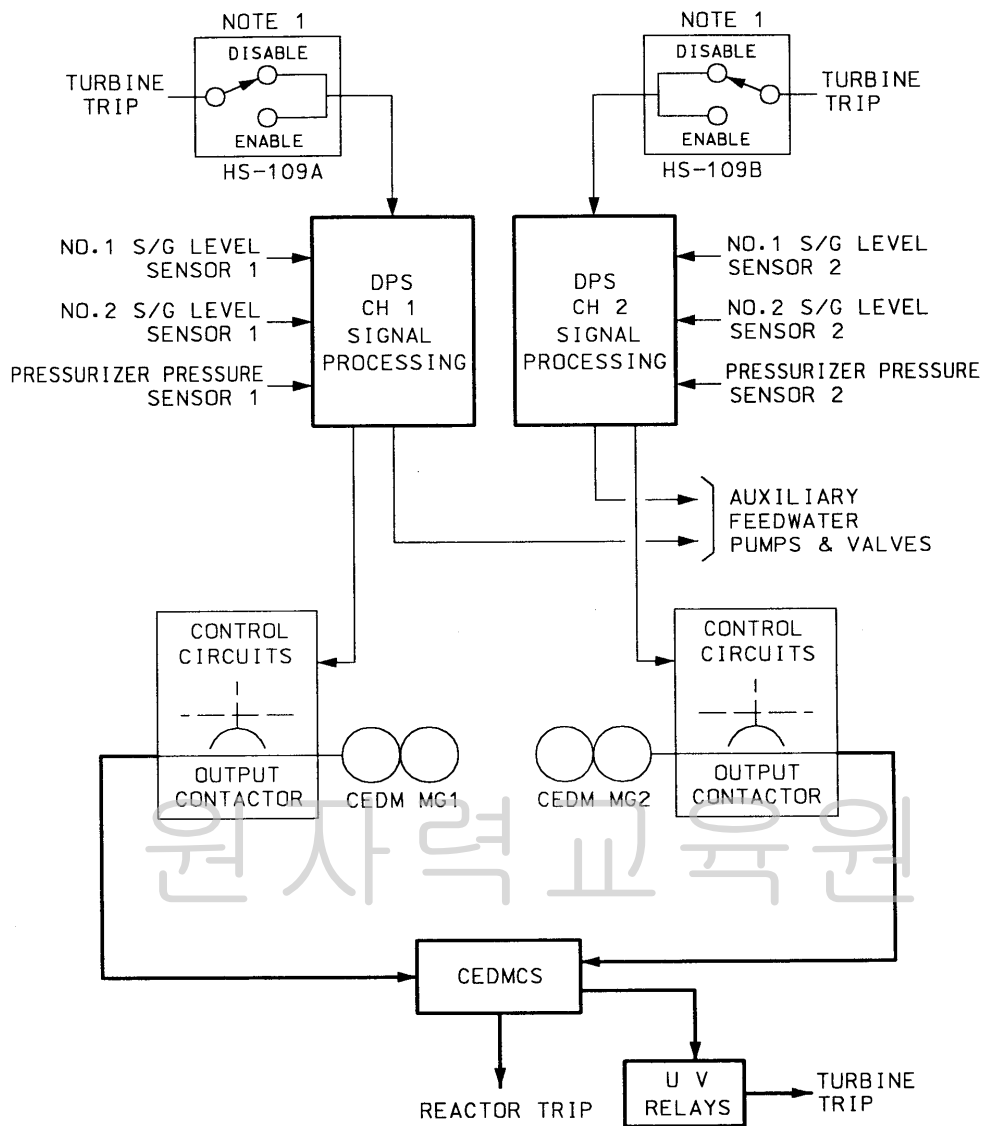
다중보호계통의 기능은 다음과 같다.

- 가압기 압력이 설정치 이상인 경우 원자로정지 신호를 발생시킴으로써, 원자로 정지불능 예상과도사건 시 그 위험을 줄일 수 있도록 한다.
- 터빈이 정지되었을 때 원자로를 정지시키는 기능이 있다. 주제어실에 위치한 “터빈정지에 의한 원자로정지 스위치(Rx Trip on TBN Trip Enable Switch)”를 가능(Enable)위치로 선택한 경우, 터빈정지가 되면 원자로정지 신호를 발생시킨다.
- 수동 버튼을 조작하여 원자로를 정지시킬 수 있다.

위의 3가지 신호는 격리된 2개의 채널로 각각 입력되어 2/2 논리가 만족되면 원자로를 정지시킨다. 채널 1의 원자로 정지신호는 전동기/발전기 세트 #1 출력접점을 개방시키고, 채널 2의 원자로정지 신호는 전동기/발전기 세트 #2 출력접점을 개방시킨다. 두 개의 전동기/발전기 세트 출력접점이 개방되면 제어봉구동장치 전원이 차단되어 제어봉이 낙하되고 원자로는 정지된다.

(2) 터빈 정지

다중보호계통에 의한 터빈정지신호는 원자로정지 신호가 발생되면 간접적으로 발생된다. 즉, 원자로 정지신호를 제어봉구동장치 제어계통의 저전압 릴레이(UV Relay) 4개가 감지하여 터빈정지신호를 발생시킨다.



NOTE .1

* HS-109A/B { RPCS 운전 가능시 "DISABLE"에 } 놓는다.
 { RPCS 운전 불능시 "ENABLE"에 }

[그림 5-8] 다중보호계통 구성도

(3) 보조급수계통 기동

증기발생기 수위가 설정치 이하가 되면 발생되며, 2개의 증기발생기 중 어느 하나의 수위가 설정치보다 떨어지면, 해당 증기발생기에 보조급수를 공급하기 위한 보조급수 작동신호(2/2 논리) 논리신호가 발생된다. 보조급수 작동신호는 발전소 제어계통(Plant Control System)으로 입력되어 보조급수계통의 펌프·밸브들을 동작시킨다.

(4) 수동정지

다중보호계통 패널에서 수동버튼(2/2 논리)을 조작하여 직접 원자로를 정지시킬 수 있도록 되어 있다.

원자력교육원

[핵심요약]

1. 원자로보호계통

- 원자로 안전제한치 초과 시 원자로를 신속하게 정지시킨다.
- 원자로정지신호 종류
 - 가압기 고압력 : 원자로냉각재 과압 방지
 - 가압기 저압력 : 핵비등이탈 방지
 - 증기발생기 저수위 : 급수상실로 인한 원자로냉각재 과압 방지
 - 증기발생기 고수위 : 증기발생기의 습분방출로 인한 터빈손상 방지
 - 증기발생기 저압력 : 원자로냉각재계통 과냉각 방지
 - 격납건물 고압력 : 격납건물 설계압력 초과 방지
 - 원자로냉각재 저유량 : 핵비등이탈 방지
 - 고-국부출력밀도 : 원전연료 보호
 - 저-핵비등이탈률 : 핵비등이탈 방지
 - 가변 과출력 : 과출력 방지
 - 고-대수출력준위 : 원자로 정지상태에서 임계방지

2. 공학적안전설비 작동계통

- 설계기준사고시 안전기기를 작동시켜 사고결과를 허용치 이내로 유지
- 공학적안전설비 작동신호 종류
 - 안전주입신호 : 가압기 저압력/격납건물 고압력 도달 시 발생
 - 격납건물격리 작동신호 : 가압기 저압력/격납건물 고압력 도달시 발생
 - 격납건물살수 작동신호 : 격납용기 고-고 압력 도달 시 발생
 - 재순환 작동신호 : 재장전수 탱크 저-저 수위 도달 시 발생
 - 주증기 격리신호 : 증기발생기 고수위/증기발생기 저압력/격납건물 고압력 도달 시 발생
 - 보조급수 작동신호 : 증기발생기 저수위 도달 시 발생

3. 다중보호계통

- 원자로보호계통이 작동하여 원자로가 정지되지 않은 경우 원자로정지 신호를 발생시켜 원자로를 정지시키며, 원자로가 정지되면 터빈정지신호 가 발생 된다.
- 원자로 정지신호 : 가압기 고압력/터빈정지(선택 사항)/수동 시 발생
- 터빈 정지신호 : 원자로가 정지된 경우 발생

제2절 노심보호 연산기계통(CPCS)

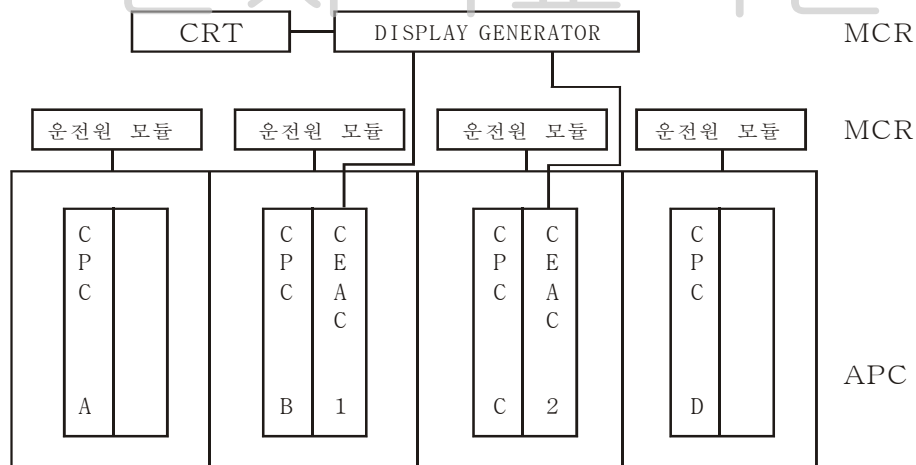
[학습목표]

1. 노심보호연산기계통의 구성기기를 설명할 수 있다.
2. 노심보호연산기의 신호처리 및 기능을 설명할 수 있다.
3. 제어봉집합체연산기 신호처리 및 기능을 설명할 수 있다.

1. 개요

노심보호연산기계통(CPCS : Core Protection Calculator System)은 발전소보호계통의 일부로서 원자로 운전제한치 중 핵비등이탈률(DNBR) 및 국부출력밀도(LPD)에 대한 정지신호를 발전소보호계통에 제공한다.

노심보호연산기계통은 4개의 독립된 채널로 이루어진 노심보호연산기(CPC : Core Protection Calculator) 4대, 제어봉집합체연산기(CEAC : Control Element Assembly Calculator) 2대, 운전원 모듈 4대 및 제어봉위치 표시계통으로 구성되어 있으며 별도의 시험장비(Test Cart)를 갖추고 있다. 각 채널은 하나의 노심보호연산기 및 운전원 모듈로 구성되고 채널 B, C는 제어봉집합체연산기를 포함한다.([그림 5-9] 참조)



[그림 5-9] 노심보호연산기계통 구성도

노심보호연산기는 2개의 제어봉집합체연산기 출력 신호와 원자로냉각재계통 감시 인자를 입력 받아 핵비등이탈률 및 국부출력밀도를 계산한 후 그 값이 미리 설정된 값을 초과하거나 미만이면 예비정지(Pretrip) 및 정지(Trip), 제어봉집합체 인출금지(CWP) 신호를 발생시키며, 또한 발전소 운전상태의 연속적 감시를 위하여 아날로그 출력과 필요한 경보를 발생시킨다.

제어봉집합체연산기는 각 제어봉집합체에 2개씩 설치된 리드스위치 위치전송기(RSPT : Reed Switch Position Transmitter)를 이용하여 73개의 제어봉집합체 위치를 감시하고, 제어봉집합체 위치 편차에 따른 페널티 계수 계산과 노심보호연산기의 출력 분포를 결정한다. 제어봉집합체연산기의 페널티 계수를 노심보호연산기로 전송 또는 제어봉집합체연산기 데이터를 제어봉집합체 위치표시계통 및 발전소컴퓨터계통으로 전송하기 위하여 광섬유 데이터 링크가 사용된다. 제어봉집합체 위치표시계통과 운전원 모듈은 주제어실에 설치되고 다른 설비들은 주제어실 패널 뒤편의 보조 보호캐비닛(APC : Auxiliary Protective Cabinet)에 설치되어 있다.

2. 계통의 주요 기능

가. 원자로 정지신호 발생

- (1) 저-핵비등이탈률(DNBR Low Trip : 1.3, Pretrip : 1.43)
- (2) 고-국부출력밀도(LPD High Trip : 21kw/ft, Pretrip : 20kw/ft)

나. 제어봉집합체 인출금지(CWP)

- (1) 핵비등이탈률 예비정지신호 또는 국부출력밀도 예비정지신호가 발생할 경우
- (2) 원자로출력 급감발신호(RPCS)가 발생할 경우
- (3) 제어봉 부 그룹 내의 편차 또는 제어봉 부 그룹 간의 편차가 발생할 경우
- (4) 제어봉 집합체 조절제어군 위치전도가 발생한 경우

다. 제어봉 위치 지시

주제어실의 모니터 화면에 제어봉의 위치를 막대그래프 형태로 표시

라. 보조정지 신호 발생

(1) 가변 과출력(VOPT) : 급격한 출력증가 시 원자로보호(가변 설정치 적용)

- 최고값(Ceiling) : 110%, Band : 10%, 출력 상승 제한치 : 12%/Min

(2) 증기발생기 비대칭 과도상태(ASGT) 발생시 원자로 보호

- 저온관 온도편차 : $8.3^{\circ}\text{C} + \text{Bias}$

(3) 운전 제한범위 초과 : 제반 변수가 설계 범위에서 운전됨을 보증

- 저온관 냉각재 온도 : 262.8°C 미만 또는 310.8°C 초과
- 가압기 압력 : 1,860 psia 미만 또는 2,390 psia 초과
- 상하부 출력 편차 : -0.5 또는 $+0.5$ 이상
- 반경방향 침투 계수 : 1.28 미만 또는 7.0 이상

(4) 원자로냉각재펌프(RCP) 정지 : 원자로 냉각재 감소에 대한 보호

- 원자로냉각재 펌프 속도가 1,130 rpm 이하

(5) 고온관 포화 정지 : 고온관에서 기포 발생 운전 배제

- 운전 압력 2,250 psia에서 고온관 온도가 337.2°C 이상

(6) 내부기기 고장시 정지신호 발생(Internal Processor Failure Trip)

3. 노심보호연산기 구성기기

가. 입·출력 계통

아날로그 입력, 접점 입력 및 펄스 입력신호의 건전성을 점검하여 디지털 신호로 전환하여 노심보호연산기의 중앙처리장치로 공급하며, 접점 출력 신호들을 발전소 보호계통 및 경보계통으로 공급한다. 또한, 입·출력 신호들을 운전원 모듈에 공급하고 계산된 아날로그 출력 신호를 주제어실 지시계로 공급한다.

나. 중앙처리장치

프로세서 메모리 보드, 다중 주변 제어기 및 인공지능 디스크 제어기로 구성되며, 프로세서 메모리 보드는 2MB 메모리를 내장한 32bit 프로세서로 구성된다.

다. 기억장치

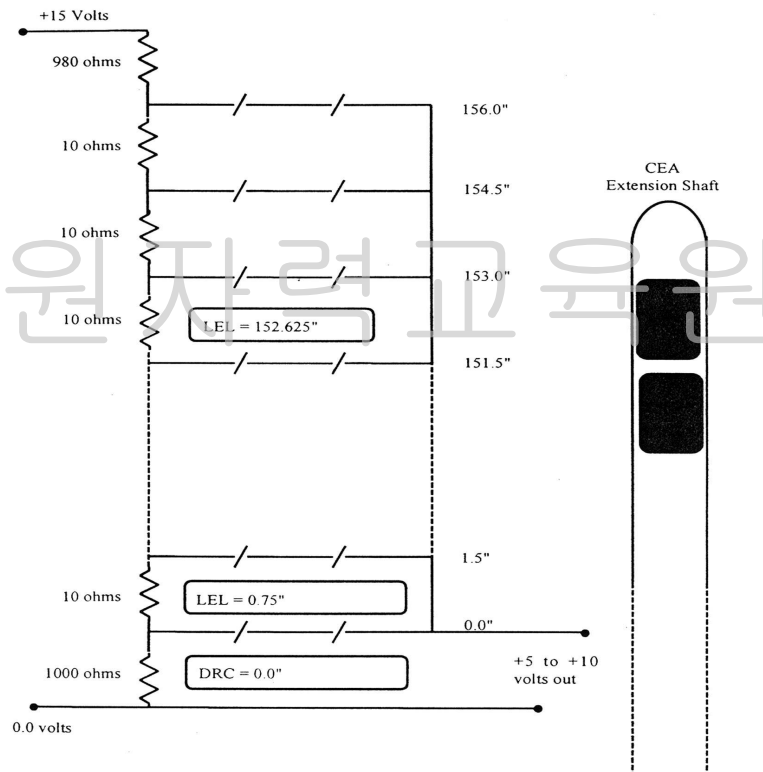
보호메모리와 비보호메모리로 구분되며, 보호메모리에는 프로그램과 재장전(Reloading) 상수를 내장하고 비보호메모리에는 변경 가능상수와 중간 계산치가 입력된다.

라. 제어봉집합체 위치 광 격리 어셈블리(CPOIA) 전송기 및 수신기

제어봉집합체 위치 광 격리 어셈블리 전송기는 채널 A, D에 설치되어 제어봉 위치신호를 제어봉집합체 연산기로 공급하기 위하여 사용되며, 수신기는 채널 B, C에 설치되어 채널 A, D로부터 빛 신호를 수신한다.

마. 리드스위치 위치전송기(RSPT)

정밀 저항기와 전자식으로 동작되는 리드스위치로 제어봉 위치를 측정한다.



[그림 5-10] 리드스위치 위치전송기(RSPT) 구성

바. 운전원 모듈

노심보호연산기마다 운전원 모듈이 1개씩 설치되며, 채널 B와 C의 운전원 모듈은 노심보호연산기 및 제어봉집합체연산기를 공유한다. 플라즈마 디스플레이 유닛은 광섬유 케이블과 모뎀을 통하여, 키 스위치 및 지시램프는 다중도체 케이블을 통하여 노심보호연산기와 제어봉집합체연산기에 연결된다.

운전원은 운전원 모듈을 이용하여 계통의 상태, 입력 신호, 계산된 변수를 감시하며 가변상수를 변경할 수 있다. 가변상수 중 자주 변하는 상수들을 TYPE I이라 하며, 자주 변경되지 않는 가변상수는 TYPE II라고 한다. 운전원 모듈에 있는 여러 가지 메뉴를 이용하여 필요에 따라 선택적으로 제어 및 감시가 가능하다.

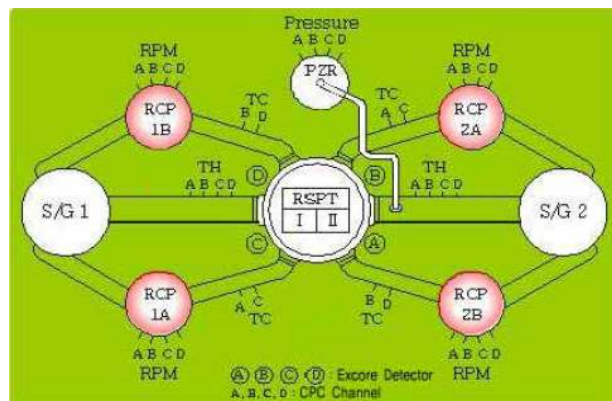
사. 시험 카트(Test Cart)

시험 카트는 두 개의 스탠드로 구성되며 모니터, 키보드, 디스크 드라이브, 프린터를 내장하고 있으며, 노심보호연산기/제어봉집합체연산기 시험·점검 시 보조 보호 캐비닛(APC : Auxiliary Protection Cabinet)에 연결하여 사용한다.

4. 입출력 신호

가. 입력 신호

노심보호 연산기는 DNBR 및 LPD 계산을 위해 다음과 같이 입력신호를 취득한다.



[그림 5-11] 노심보호연산기 입력 신호

CPC 입력신호	채널별 신호수 량 (개)	설 명	표시 범위	형태	정확도
원자로냉각재펌프 속도	4	각 원자로냉각재펌프 속도	10~100%	디지털	정격±0.25%
저온관 온도	2	대각선 방향 저온관 냉각재 온도	446~626°F	아날로그	±1.0°F
고온관 온도	2	고온관 냉각재 온도	482~662°F	아날로그	±1.0°F
가압기 압력	1	가압기 압력	1500~2500psia	아날로그	±6.00psia
노외 중성자 신호	3	노외 중성자속 검출기 신호	0~200%	아날로그	±0.5%
CEA 페널티 계수	2	제어봉집합체 연산기에서 계산된 제어봉 편차 페널티 계수	0~8.0	디지털	±10 ⁻²
제어봉 위치	18	목표 CEA 위치	0~100%	아날로그	±0.5%

(1) 출력 신호

CPC 출력 신호	형 태	표시 범위(형태)
저-핵비등이탈률 정지 및 예비정지	디지털(접점 출력)	0, 1(로직)
고-국부출력 정지 및 예비정지	디지털(접점 출력)	0, 1(로직)
감지기 고장	디지털(접점 출력)	0, 1(로직)
제어봉 인출 금지	디지털(접점 출력)	0, 1(로직)
핵비등이탈률 여유도	아날로그	0~10
국부출력밀도 여유도	아날로그	0~25(kW/ft)
중성자속 출력	아날로그	0~200(%)

5. 신호처리 및 연산

가. 원자로 냉각재 유량 측정

원자로 냉각재 유량을 측정하기 위해서는 먼저 저온관 유량을 측정해야 하며, 이를 위하여 각 원자로냉각재펌프(RCP)의 속도와 저온관 냉각재의 비체적을 사용한다. 원자로냉각재펌프 축에는 44개의 홈이 일정한 형태로 되어 있는 원판 2개가 설치되어 있고, 각 원판에는 속도센서가 3개씩 총 6개의 센서가 설치되어 있다. 이 중 4개의 센서는 안전채널 A, B, C, D로써 노심보호연산기로 입력되고, 2개의 센서는 비안전 채널로써 노심운전제한치 감시계통(COLSS)으로 입력된다. 원판이 회전하면 속도센서는 홈 위치에서 펄스를 발생한다.

각각의 고온관 질량유량은 저온관 4개의 질량유량을 계산한 후 저온관 2개 유량을 합하여 구하고, 각각의 고온관 유량을 합산하여 총 노심유량을 산출한다. 총 노심유량에 유량 조정상수(FC 1)를 곱하여 교정 노심의 냉각재 질량유량을 산출한 후 노심보호연산기의 1차측 출력 및 핵비등이탈률 계산에 이용한다. 노심보호연산기의 유량 조정상수는 노심운전제한치 감시계통의 질량유량을 기준으로 운전원이 주기적으로 교정한다.

나. 고온관 및 저온관 온도 측정

노심보호연산기 채널마다 고온관 온도 검출기 신호 2개, 저온관 온도 검출기 신호 2개가 입력된다. 저항 온도검출기(Resistance Temperature Detector)의 신호는 아날로그신호이므로 이를 입력처리 카드(A/D Card)에서 카운트 수로 변환한다. 이 카운트 수는 미리 정해진 최소, 최대 값으로 제한되며 온도 값으로 변환된다.

다. 1차측 압력 측정

가압기 압력을 1차계통 압력으로 사용한다. 4개의 가압기 압력(협역채널) 신호가 발전소감시계통(PMS)과 노심보호연산기로 입력된다. 가압기 압력신호는 가압기 고압력 원자로 정지, 핵비등이탈률, 국부출력밀도 계산에 사용되며, 주제어실 지시계에 연속적으로 나타난다.

라. 노외중성자속 측정

노외중성자속 감시계통 검출기는 원자로 주위에 위치하며 신호처리 설비는 보조 건물과 격납용기 내에 위치한다. 노외중성자속 검출기는 중성자속을 2×10^8 CPS~200%까지 연속적으로 감시한다. 노외중성자속 검출기집합체는 4개의 채널이며, 하나의 검출기집합체 채널은 3개의 서브채널로 구성된다. 서브채널 검출기는 핵분열함으로서 원자로에 수직으로 설치된다.

노심보호연산기로 입력되는 노외중성자속 감시계통의 3개 서브채널 검출기 신호는 DNBR과 LPD, 선형출력을 계산하는데 사용된다. 이들 3개 검출기 신호는 합산기를 거쳐 저온관 그림자 효과와 제어봉집합체 그림자 효과로 보정된다.

저온관 그림자 효과는 저온관 온도가 감소할 때 일어난다. 노심배열 주위의 냉각재 온도가 낮아지면 냉각재 밀도가 증가하여 중성자가 누설되는 확률이 감소한다. 노외중성자속 검출기 신호는 중성자 누설에 비례하기 때문에 저온관 그림자 효과로 인해 검출기는 실제출력보다 낮게 지시한다. 온도 그림자계수는 이러한 효과를 보정함으로써 정확한 노심출력을 구하기 위한 것으로 기준 저온관 온도를 기준으로 계산된다.

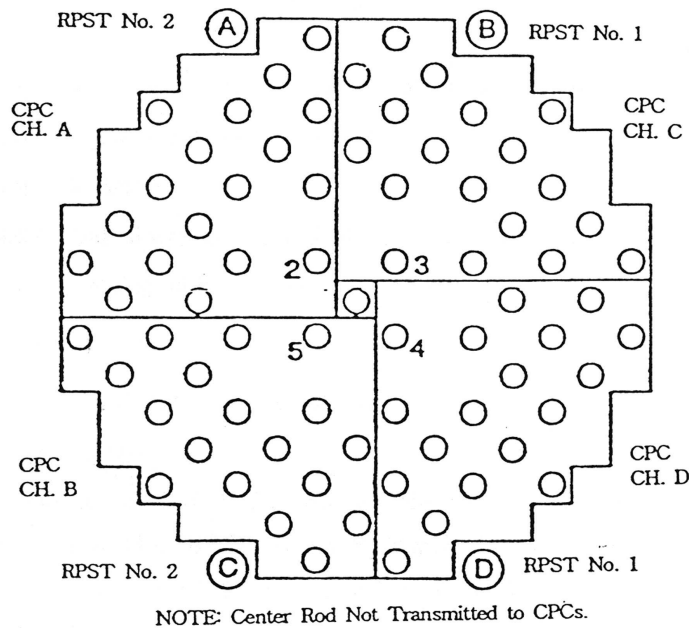
노외중성자속 검출기의 출력은 노심에서 누설된 중성자의 양에 비례하며, 동일 출력에서도 노심에 삽입된 제어봉집합체의 반경방향 위치에 따라 검출기 출력이 달라진다. 제어봉집합체 그림자효과는 제어봉집합체가 노심에 삽입될 때 일어나는데, 예를 들어 제어봉집합체가 노심 중앙에 삽입되면 노심출력이 노심 주위로 치우쳐 중성자 누설이 증가하므로 검출기는 실제 출력보다 높게 지시한다. 반대로, 제어봉집합체가 노심 외곽지역에 삽입되면 출력은 노심 중앙이 크게 되는데, 이렇게 되면 누설이 감소하여 검출기 신호는 실제 출력보다 작아진다. 이러한 제어봉집합체 그림자 효과를 최소화하기 위하여 노외 중성자속 검출기는 비교적 제어봉집합체 그림자 효과를 받지 않는 곳에 설치되며, 노심보호연산기는 제어봉위치 신호를 이용하여 그림자 효과를 보정한다..

제어봉집합체연산기는 노심의 출력분포를 계산할 때 노심을 축방향으로 20등분하여 계산하므로 제어봉집합체 그림자계수도 20개의 각 평면에서 제어봉집합체의 삽입여부에 따라 표로 입력된 값을 제어봉집합체 위치에 따라 선택하여 이용한다.

마. 제어봉집합체 위치 측정 및 페널티 계산

제어봉집합체 위치신호는 노심보호연산기 및 제어봉집합체연산기로 입력된다. 출력운전 중 제어봉집합체가 노심에 삽입되면 출력의 크기와 반경방향 및 축방향 출력분포가 변화하므로 노심 내의 제어봉집합체 위치는 출력분포를 결정하는 주요 변수 중의 하나이며, 제어봉집합체가 바람직하지 않은 형태로 운전되어도 출력분포가 비정상적으로 변하게 된다. 출력분포 합성에 있어 노심보호연산기에서 고려하는 제어봉집합체의 비정상 운전형태로는 조절제어봉 그룹 위치전도, 제어봉집합체 그룹 내의 부그룹간 편차, 제어봉집합체 부그룹 내에 있는 개별 제어봉집합체 사이의 편차이다.

노심보호연산기와 제어봉집합체연산기에서 사용하는 제어봉집합체 위치는 각 제어봉집합체 하우징에 위치하는 두 개의 리드스위치 전송기(RSPT)를 이용하여 측정한다. 리드스위치 전송기는 직렬로 된 리드스위치들로 구성되고, 전압 분배기는 정밀 저항기가 결선되어 있다. 제어봉집합체 연장 축에 붙어있는 자석은 근접한 리드스위치를 작동하여 제어봉집합체 위치에 비례하는 전압을 형성한다. 4개의 노심보호연산기는 독립된 입력신호를 사용하지만 제어봉집합체 하우징에는 4개의 분리된 리드스위치를 설치할 공간이 없어 노외계측기 안전채널 A, B, C, D에 대응하는 노심 사분면에 위치한 18개 제어봉집합체 위치만을 감지한다. 각 노심보호연산기와 직접 연결된 18개 제어봉집합체를 그 채널의 표적 제어봉집합체(Target CEA)라 한다. [그림 5-12]에서 나타난 제어봉집합체 2, 3, 4, 5는 한 개의 부 그룹인데, 노심 중심을 기준으로 각 노심의 4분원에 대칭적으로 위치하며 각각 노심보호연산기 채널 A, B, C, D에 해당한다.



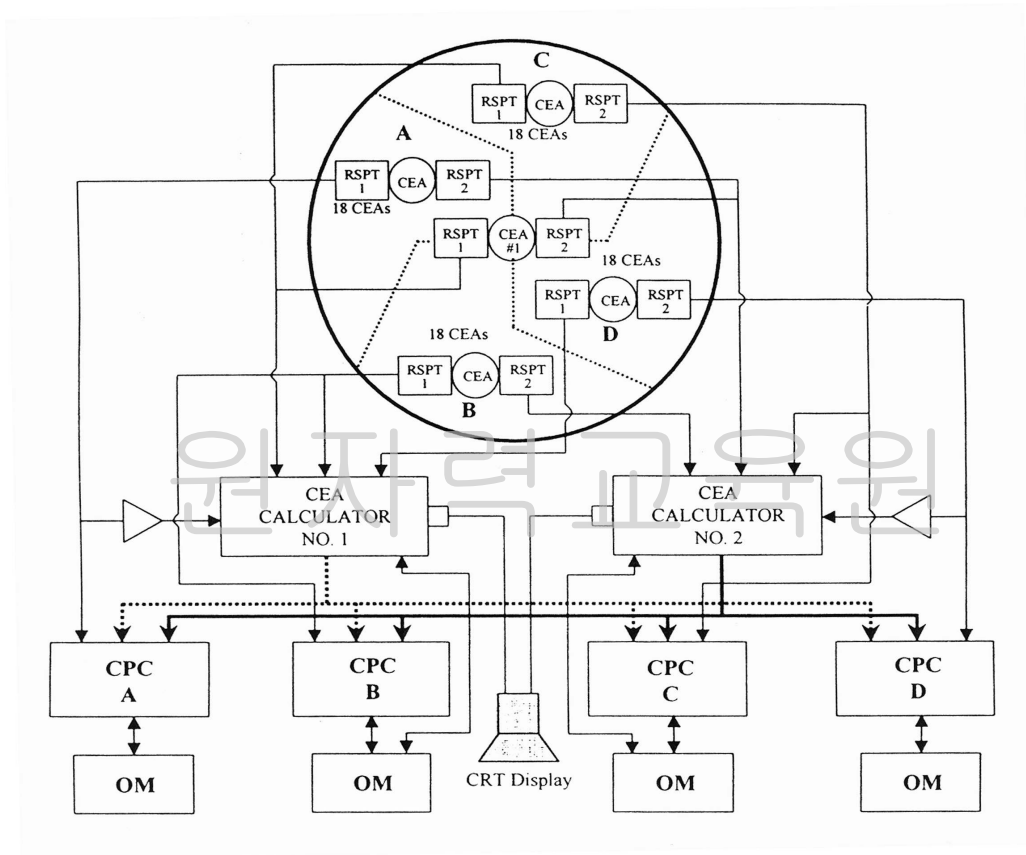
[그림 5-12] 노심보호연산기 표적 제어봉집합체(Target CEA)

노심보호연산기는 부 그룹 내에서의 위치편차는 알 수는 없지만 어떤 부 그룹 내의 제어봉집합체가 다른 세 개의 제어봉집합체의 위치를 대표할 수가 있다면, 전체 노심을 감시할 수가 있게 된다.

심한 침투치를 갖는 반경방향 출력분포도는 노심 평균출력은 낮지만 피크 부분에 있는 연료봉은 매우 큰 출력을 내는 것을 의미한다. DNBR과 LPD는 노심의 연료봉이 허용 핵연료 설계제한치에 접근하지 않도록 보호하기 때문에 만약 이 값을 위반할 위험이 있으면 발전소를 정지시킨다. 노심보호연산기는 계산시간을 줄이기 위하여 반경방향 침투치를 미리 만들어진 표에서 계산된 값을 이용하며, 이 값들은 노심에 삽입된 제어봉집합체 그룹의 함수이다.

반경방향 침투치를 결정하기 위하여 노심보호연산기는 노심을 축방향으로 20등분하여 각 부분마다 제어봉집합체 그룹을 확인한다. 각 평면은 같은 반경방향 침투치표를 이용하지만 각 평면의 침투 값은 제어봉집합체 삽입정도에 따라 달라진다.

제어봉집합체 그룹들의 삽입 순서가 잘못되었거나 그룹 내에서 부 그룹 편차가 생겼을 경우에는 4개의 노심보호연산기가 이 편차를 감지하여 표에 있는 반경방향 침 두치 페널티 계수를 적용한다. 그러나 각 부 그룹 내에서 개개의 제어봉집합체에 편차가 생겼을 경우는 확인이 불가능하다. 즉, 채널 A와 B는 노심의 A와 B 사사분면에 있는 RSPT #1으로부터 표적 제어봉집합체의 신호를 받고, 채널 C와 D는 C와 D 사사분면에 있는 RSPT #2에서 표적 제어봉집합체의 신호를 받기 때문에 부 그룹 내에서의 편차를 감지할 수 없다.([그림 5-13] 참조)



[그림 5-13] 노심보호연산기 채널별 CEA 신호 분배도

제어봉집합체연산기의 기능 중 하나는 제어봉집합체 개개의 편차에 관한 정보를 노심보호연산기에 제공하는 것이다. 제어봉집합체연산기는 부 그룹 내에 4개의 제어봉

집합체를 감시하여 부 그룹 내에서 제어봉집합체 편차가 설정 값보다 크면 노심보호 연산기에 페널티 계수를 전송한다. 두 채널의 제어봉집합체연산기는 73개의 제어봉집합체를 감시하여 부 그룹 내에 편차가 발생한 제어봉집합체를 결정한다.

제어봉집합체 삽입에 관한 편차가 일어나지 않으면 핵비등이탈률과 국부출력밀도의 페널티 계수는 1.000이 되고, 편차가 불감대(8인치)를 벗어나면 각 제어봉집합체연산기는 핵비등이탈률과 국부출력밀도 계산에 사용할 페널티 계수를 계산한다.

각 제어봉집합체연산기에서 계산된 페널티 계수를 4대의 노심보호연산기에 보내면 노심보호연산기는 2대의 제어봉집합체연산기 출력을 비교하여 큰 페널티 계수를 취해 핵비등이탈률과 국부출력밀도 계산에 사용한다.

노심보호연산기는 18개의 개별 제어봉집합체 신호를 노심 높이에 대한 백분율로 변환하며, 그룹 내에서 가장 낮은 제어봉집합체 위치를 선택하여 각 부 그룹과의 편차를 구한다. 그리고 편차의 크기가 3.3% 이상이면 부 그룹편차 경보를 발생시키고, 6.6% 이상이면 부 그룹편차 페널티 계수를 적용한다. 부 그룹의 수가 하나인 조절제어봉 그룹 4와 5는 부 그룹편차 자체가 계산되지 않으며 부분강 제어봉은 P1, P2를 하나의 그룹으로 간주하여 P1와 P2의 편차가 6.6%(25.15cm) 이상이고 이들이 노심의 6.6%~93.4% 사이에 위치하면 페널티 계수가 적용된다. 만약 운전원이 2대의 제어봉집합체연산기를 모두 운전 불능상태로 운전하면 노심보호연산기는 제어봉집합체가 노심에 삽입되어 있어도 모든 제어봉집합체가 완전 인출된 것으로 간주한다.

노심보호연산기는 제어봉집합체의 위치전도, 부 그룹 편차 페널티계수를 직접 계산하고 개별 제어봉집합체 편차에 대한 페널티 계수는 제어봉집합체연산기에서 계산된 값을 이용한다. 제어봉집합체연산기 페널티 계수는 핵비등이탈률 및 국부출력밀도 계산에 직접 이용되어 제어봉집합체연산기 페널티 계수의 증가에 비례하여 핵비등이탈률이 감소되고 국부출력밀도가 증가한다.

제어봉집합체 위치는 주제어실에 있는 모니터 화면을 통하여 막대그래프 형식으로 각 제어봉, 정지봉 및 부분강 제어봉 별로 표시된다.

바. 반경방향 및 축방향 출력분포(Radial & Axial Power Distribution)

반경방향의 출력분포는 노심을 수평으로 절단했을 때 각 연료봉에서 나오는 출

력을 나타낸 것으로 노심 반경의 함수이다. 노심보호연산기는 노심을 축 방향으로 20 등분하여 각 평면에서 반경방향의 출력분포를 구한다. 반경방향 침투계수 계산은 많은 시간이 소요되므로 노심보호연산기 보호기능의 신속성을 충족하기 위해 제어봉 위치 신호를 받아 정상 제어봉 구성에 의해 미리 정해진 반경방향 침투계수를 이용한다.

축방향 출력분포는 노심 상부에서 하부까지의 출력 측면도를 나타낸다. 축방향 출력분포는 가능하면 일정하게 유지되는 것이 바람직하며 날카로운 축방향 침투 출력 분포는 핵비등이탈률이나 국부출력밀도에 나쁜 영향을 주게 된다.

각 노심보호연산기는 4개의 노외핵계측기 안전채널 중 해당 채널의 신호만을 받는다. 노외핵계측기 안전채널의 각채널은 수직방향의 3개 서브채널 계측기로 구성되어 있는데, 서브채널 계측기가 해당 높이의 노심출력만을 읽어야 정확한 출력분포가 계산된다. 그런데 노외핵계측기는 한 노심영역 외의 다른 중성자 누설을 검출할 수 있다. 즉, 축방향의 출력간섭이 발생된다. 이러한 축방향의 출력 간섭효과를 보정하여 각 계측기의 출력이 해당 높이의 노심출력만을 나타내도록 보정하는 함수가 형상처리행렬(SAM : Shape Annealing Matrix)인데, 형상처리행렬로 계측기 출력을 보정해도 문제가 완전히 해결되지는 않는다. 즉, 축방향 출력분포에 이용되는 출력은 노심 전체를 대변해야 하는데 노외중성자속 계측기 출력은 노심 주변 출력만을 나타냄으로써 이를 보정할 필요가 있으며, 노심보호연산기 알고리즘은 노심 주변출력을 노심 평균출력으로 변환하는 기능을 포함하고 있다.

축방향 출력편차(ASI)는 노심출력에 대한 노심 하부출력과 노심 상부 출력의 비이며 노심보호연산기는 축 방향 출력분포를 이용하여 축방향 출력편차를 계산한다.

즉, “축방향 출력편차 = (노심 하부출력 - 노심 상부출력)/노심출력”이다.

사. 3차원 출력분포(3-Dimensional Power Distribution)

핵비등이탈률 및 국부출력밀도를 계산하기 위해서는 3차원 출력분포가 필요하며, 노심보호연산기는 노심의 20개 평면에서 계산한 출력분포 중 침투치를 이용한다.

아. 사분출력경사비(Azimuthal Tilt)

사분출력경사비는 노심 사분면 사이의 출력편차를 나타내며 노심운전제한치 감시계통(COLSS)에서 노내 핵계측기를 이용하여 계산한다. 노심보호연산기는 노심운전

제한치 감시계통 계산 값을 기준으로 운전원이 입력한 사분출력경사비를 사용한다. 노심운전제한치 감시계통의 사분출력경사비는 정상상태에서 1% 정도이며 노심보호연산기는 이보다 큰 2% 정도로 입력된다.

자. 국부출력밀도(LPD) 계산

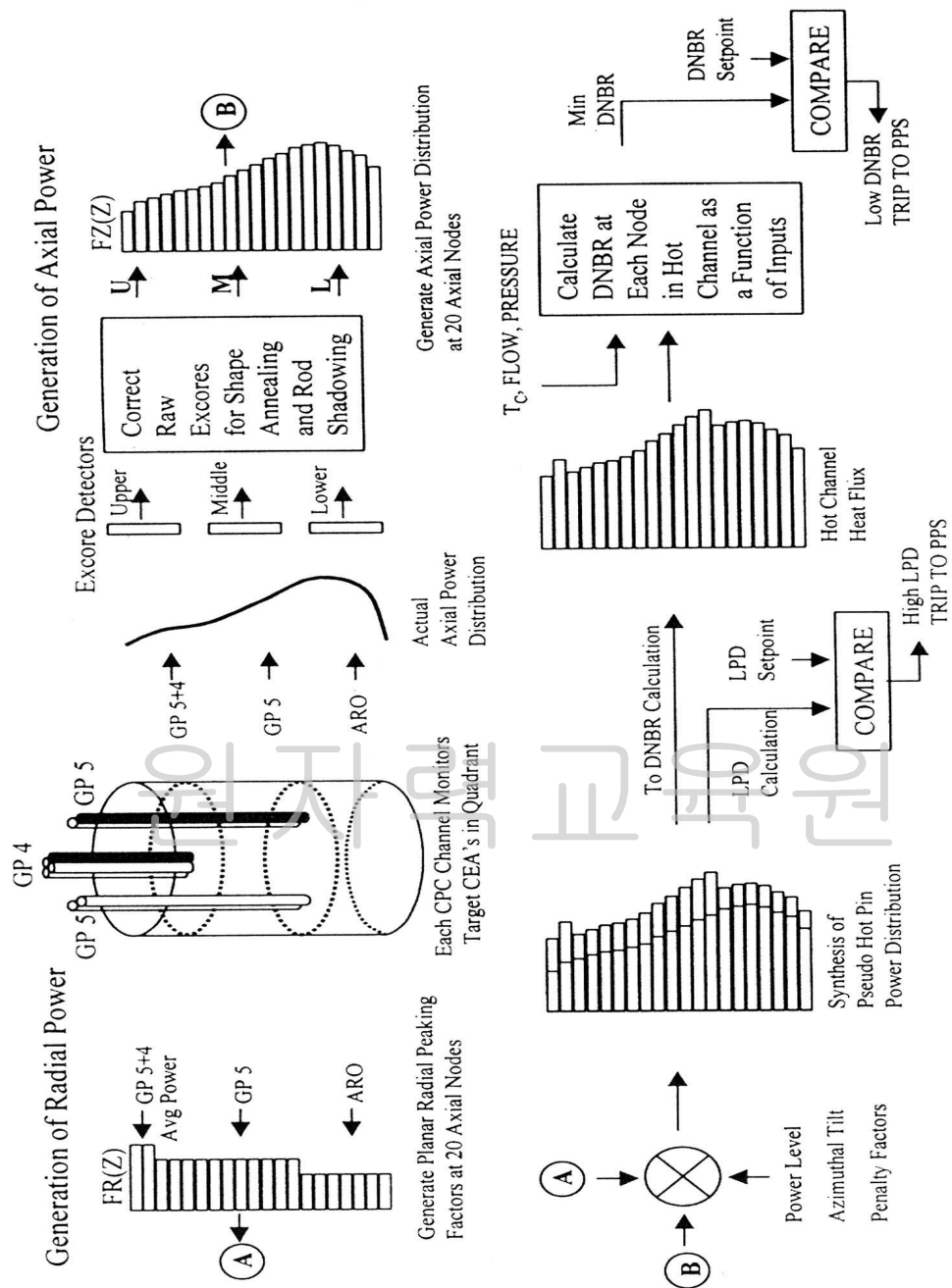
노심보호연산기는 가장 제한적인 3차원의 마디(Node)를 찾아 국부출력밀도를 계산하기 때문에 반경방향 및 축방향 출력분포 등을 이용하여 3차원 출력분포를 계산하고 노심에서 출력첨두를 나타내는 마디를 3차원 첨두계수로 놓는다. 국부출력밀도를 계산하는 주요 인자는 3차원 첨두계수와 노심출력으로서 개념적으로는 노심 첨두 선형열출력을 노심 평균 선형열출력으로 나눈 값에 노심출력을 곱하여 산출한다. 그러나 실제적인 국부출력밀도 계산에는 몇 개의 인자가 더 고려되며, 노심출력은 교정열출력과 교정 중성자속 출력중 큰 값이 이용된다.

차. 핵비등이탈률(DNBR) 계산

핵비등이탈률 계산도 국부출력밀도와 마찬가지로 3차원 출력준위와 출력분포 합성을 이용하지만, 출력준위 분포외에도 저온관 온도, 원자로 냉각재 유량, 그리고 가압기 압력의 영향을 받는다.

핵비등이탈률 계산이 국부출력밀도와 다른 점은 국부출력밀도는 노심에서 최대 열출력이 나오는 마디의 3차원 첨두계수가 필요한 반면, 핵비등이탈률은 노심의 연료봉 중에서 최대출력이 나오는 연료봉에 대한 연료봉 첨두계수(Integrated Radial Peaking Factor)가 필요하다. 즉, 국부출력밀도의 고려대상은 최대 출력을 내는 노심의 한 점이며 핵비등이탈률은 최대 출력이 나오는 채널이다. [그림 5-14]는 LPD 및 DNBR의 생성개념을 나타낸 것이다.

핵비등이탈률은 연료봉 첨두계수와 노심출력, 저온관 온도, 냉각재 유량 및 가압기 압력을 고려하며 최종적으로 제어봉집합체연산기에서 전송된 핵비등이탈률 페널티 계수를 곱해서 계산한다. 핵비등이탈률 계산에 고려된 인자 중 첨두계수, 노심출력, 저온관 온도가 증가하면 핵비등이탈률은 감소되고 냉각재 유량 및 가압기 압력이 증가하면 핵비등이탈률은 증가한다. 핵비등이탈률의 원자로 정지 설정치는 1.3이다.



[그림 5-14] LPD 및 DNBR 생성 개념도

6. 제어봉집합체연산기(CEAC)

가. 입출력 신호

제어봉집합체연산기는 73개의 모든 제어봉집합체 위치를 감지하여 부 그룹 내의 제어봉집합체 편차에 대한 페널티계수를 계산하고 이를 노심보호연산기에 전송한다. 또한 제어봉집합체연산기는 부 그룹편차 페널티계수 외에 원자로출력 급감발(RPCS) 발생, 제어봉집합체 편차형태 및 제어봉집합체연산기 고장 등의 경우에 정보를 각 노심보호연산기에 전송한다.

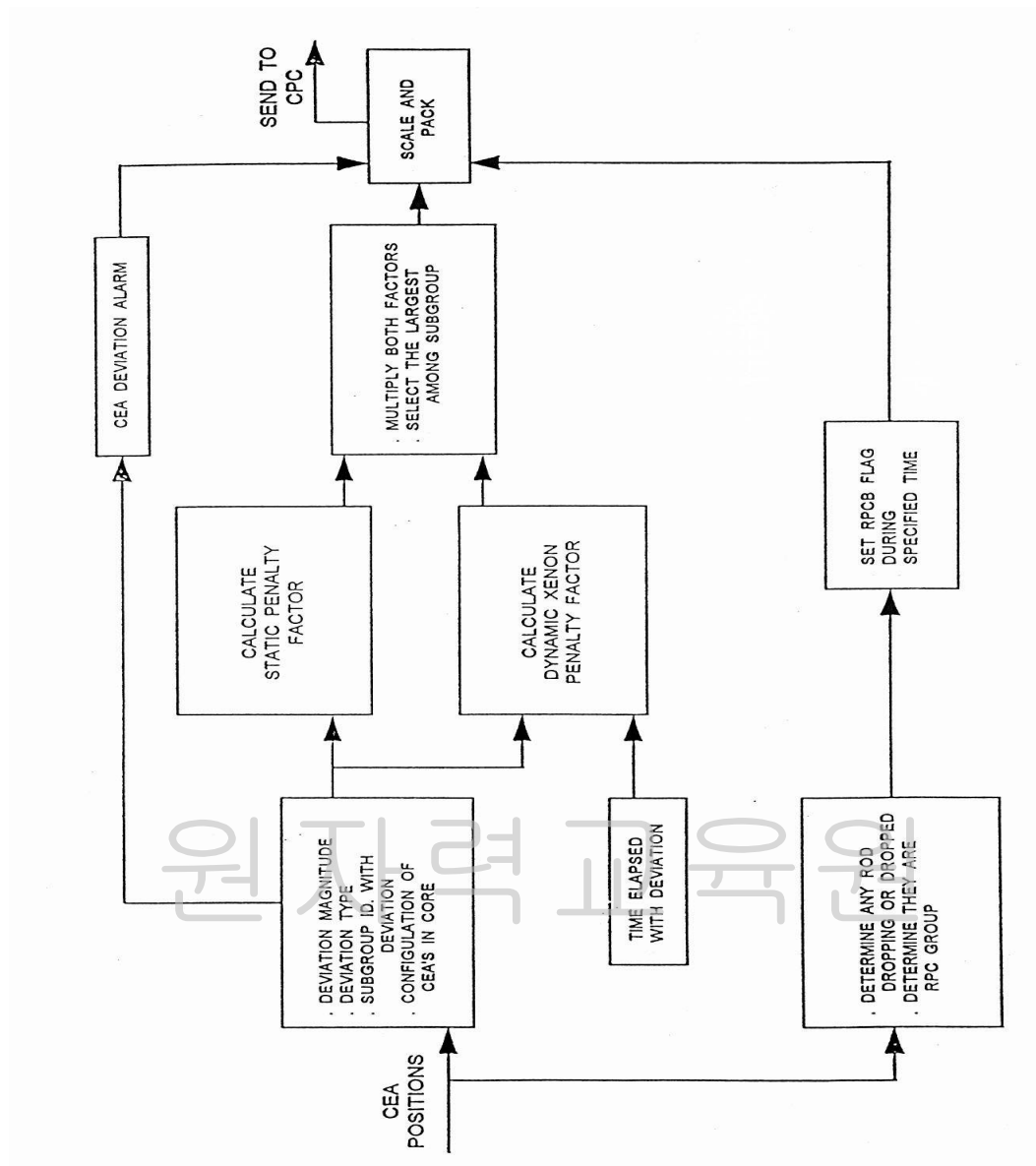
나. 입력신호 처리

제어봉집합체연산기 #1은 RSPT #1, 제어봉집합체연산기 #2는 RSPT #2로부터 73개의 제어봉집합체 위치신호를 검출하며, 위치신호의 범위점검과 변화율 점검을 수행하여 입력이 제한범위를 벗어나거나 제어봉집합체 인출속도가 11.43 cm/0.1sec 이상, 또는 삽입속도가 24.96 cm/0.1sec 이상이면 그 감지기는 고장난 것으로 간주한다. 노심보호연산기는 제어봉집합체 위치를 노심 높이에 대한 인출위치의 백분율로 변환하여 이용하는 반면 제어봉집합체연산기는 인출위치를 인치로 변환한다.

다. 제어봉집합체 편차 페널티계수

제어봉집합체연산기는 제어봉집합체가 노심의 25.146~355.85cm 사이에 위치하고 부 그룹 내의 편차가 13.97cm 이상이면 편차경보를 발생하고, 편차가 25.15cm 이상이 되면 페널티계수를 계산한다. 그러나 4발 제어봉집합체의 경우에는 편차 형태가 내향(하나의 제어봉집합체가 다른 제어봉집합체에 비해 삽입된 편차)이면 페널티계수 적용 대상에서 제외된다.

제어봉집합체연산기 페널티 계수는 정적요소와 동적요소의 결합이며 정적요소는 편차의 크기에 따라 증가하고, 동적요소는 편차 발생 후 경과시간에 따라 증가한다. 정적요소는 단순히 편차의 크기를 고려한 것이며 동적요소는 시간에 따른 지논의 변화를 고려한 값이다. 제어봉집합체연산기는 18개 부 그룹의 페널티계수를 계산하여 가장 큰 값을 제어봉집합체연산기 페널티계수로 선택한다.



[그림 5-15] 제어봉집합체연산기 기능 블록도

라. 원자로 출력급감발(Reactor Power Cutback)

제어봉집합체연산기는 제어봉집합체 삽입속도를 이용하여 제어봉집합체 낙하여부를 판정하며 원자로 출력급감발 그룹(조절제어봉 4 또는 5)이 하나 이상 낙하되면

원자로 출력급감발이 발생한 것으로 간주한다. 즉, 두 주기(200 msec) 전의 제어봉 위치와 현재의 제어봉 위치를 비교하여 위치변화가 13.97cm 이상이면 제어봉이 낙하된 것으로 본다. 제어봉집합체연산기는 이 정보를 25초 동안만 노심보호연산기로 전송하며 25초가 경과되면 원자로출력 급감발 발생 표시를 지운다.

마. 제어봉집합체연산기의 고장

제어봉집합체연산기는 제어봉집합체연산기의 고장이나 시험모드, 4개 이상의 위치 전송기 고장, 한 사분면 제어봉집합체의 4개 이상이 편차 등의 경우 자체 고장으로 판정하여 이를 노심보호연산기에 전송한다.

바. 노심보호연산기로의 자료전송

제어봉집합체연산기는 제어봉집합체연산기의 고장, 핵비등이탈률 페널티 계수, 국부출력밀도 페널티 계수, 원자로출력 급감발, 제어봉집합체 편차형태 및 페널티 계수 변환방법 등의 정보를 0.1초 간격으로 노심보호연산기에 전송한다.

7. 노심보호연산기 운전

가. 정상운전

정상운전이란 노심보호연산기계통의 모든 기능이 정상적으로 유지되는 상태로 운전원은 운전원 모듈, 제어봉집합체 위치표시계통, 주제어실 지시계 및 경보들을 이용하여 노심보호연산기계통을 운전한다.

노외중성자속 감시계통 대수출력이 $10^{-4}\%$ 이하에서는 제어봉 인출금지 신호가 자동 우회되고, CPC Trip Bypass 스위치(4채널 동시 가능)를 ON 위치로 놓으면 노심보호연산기에 의한 원자로정지 신호가 우회되는데, 우회기능은 출력 $10^{-4}\%$ 이상에서 자동 제거된다. 원자로 출력 $10^{-4}\%$ 이상에서의 원자로정지 신호의 우회는 발전소보호계통에서 한 채널씩 가능하다.

운전원은 필요시 채널 B, C의 운전원 모듈에서 “연산기 선택(Calculator Select)” 스위치를 이용하여 노심보호연산기나 제어봉집합체연산기를 선택한다. 운전원 모듈의 화면은 노심보호연산기 및 제어봉집합체연산기 각각 7개 메뉴로 구성되어 있

으며 운전원은 원하는 번호를 눌러 운전을 수행한다.

제어봉집합체 위치 표시계통은 운전원 키패널, 화면 및 표시발생기로 구성되어 있으며, 운전원 키 패널 스위치를 이용하여 제어봉집합체연산기 #1 또는 제어봉집합체연산기 #2로 신호를 선택하면 그룹 또는 개별 제어봉집합체 위치를 화면 모니터를 통해 막대그래프 형태로 확인이 가능하다. 정상운전 중 일차계통의 운전은 노심운전제한치 감시계통의 운전변수를 확인하여 수행하고, 노심보호연산기계통은 경보, 지시계, 운전원 모듈을 통하여 각종 감시수단을 제공한다.

노심보호연산기 및 제어봉집합체연산기의 상수는 고정상수, 재장전상수, 변경가능 상수로 분류되는데, 변경가능 상수는 운전 중 노심보호연산기 계산의 부정확성을 교정하기 위해서 주기적으로 변경될 수 있다. 상수 변경 시 주의할 점은 변경된 상수는 핵비등이탈률 및 국부출력밀도를 변화시키므로 정확한 상수를 입력하고 상수 변경 후 핵비등이탈률 및 국부출력밀도의 추이를 관찰해야 한다. 이 중에서 고정상수는 노심보호연산기 프로그램에 직접 입력되어 있는 상수이며, 재장전 상수는 재장전 노심설계에 따라 플로피 디스크로 시험카트에서 입력된 상수로서 운전원모듈에서 확인 및 변경이 불가능하다.

나. 비정상운전

노심보호연산기는 4채널로 구성되어 있으며 하나 또는 두 개의 노심보호연산기 채널이 운전 불가능할 때는 기술지침서의 요건에 충족시켜야 기동 또는 출력운전을 계속할 수 있다.

제어봉집합체연산기는 직접적으로 원자로를 정지시킬 수 있는 기능이 없으므로 제어봉집합체연산기 채널을 우회하는 기능도 없다. 기술지침서는 제어봉집합체연산기 운전 불능시 요건을 기술하고 있으며 운전을 계속하기 위해서는 이들 요건을 충족시켜야 한다.

제어봉집합체연산기의 운전 불능상태로 운전하기 위해서는 제어봉집합체연산기의 운전상태에 따라 적절한 상수를 4채널의 노심보호연산기 PID 062에 입력해야 한다. 즉, 제어봉집합체연산기가 모두 정상이면 0, 제어봉집합체연산기 #1이 운전 불능이면 1, 제어봉집합체연산기 #2가 운전불능시에는 2, 그리고 두 대의 제어봉집합체연산

기가 모두 운전 불능할 경우는 3을 입력한다.

두 대의 제어봉집합체연산기가 정상 운전될 때 노심보호연산기는 2대의 제어봉집합체연산기로부터 전송되는 페널티계수 중 큰 것을 선택한다.

노심보호연산기계통을 한 제어봉집합체연산기를 운전불능 상태로 운전하면 운전불능 제어봉집합체연산기에서 마지막으로 전송된 페널티계수와 운전 중인 제어봉집합체연산기에서 오는 페널티 계수 중 큰 것을 선택한다. 노심보호연산기계통을 2대의 제어봉집합체연산기가 운전 불능상태로 운전하면 노심보호연산기의 핵비등이탈률 출력여유도는 6%, 국부출력밀도 출력여유도는 10%가 감소한다. 2대의 제어봉집합체연산기가 운전불능일 때 노심보호연산기는 모든 제어봉집합체연산기 위치를 완전인출로 간주하여 제어봉집합체가 삽입된 경우 제어봉집합체 그림자계수를 적용하지 않아 중성자속 출력이 부정확해질 수 있다.

다. 시험운전

시험운전은 노심보호연산기계통 기동전이나 정상운전 중 시험카트를 노심보호연산기 보조보호캐비닛에 연결하여 수행한다. 시험카트를 보조캐비닛에 연결하면 시험카트의 화면에 메뉴가 나타나며, 이때 운전원 모듈은 운전 불능상태가 된다.

원자력교육원

[핵심요약]

1. 구성 기기

- 노심보호연산기 4대, 제어봉집합체연산기 2대, 제어봉위치 지시 모니터

2. 주요 기능

- 원자로 정지신호 발생
 - 저-핵비등이탈율 : 핵비등이탈 방지로 연료 손상 방지
 - 고-국부출력밀도 : 연료 손상 방지
- 제어봉 인출금지신호 발생
- 제어봉 위치 지시
- 보조정지신호 발생
 - 가변 과출력(원자로출력의 급격한 증가 시)
 - 증기발생기 비대칭 과도상태 발생 시
 - 운전제한 범위 초과 시
 - 원자로냉각재펌프 정지 시
 - 고온관 포화온도 도달 시
 - 내부기기 고장 발생 시

3. 노심보호연산기 기능

- 입력신호
 - 원자로냉각재펌프 속도, 저온관 온도, 고온관 온도, 가압기 압력, 노외 핵계측기 신호, 제어봉 위치, CEA 페널티 계수
- 신호 처리
 - 원자로 냉각재 유량 계산
 - 제어봉집합체 위치측정 및 페널티 계수 계산
 - 반경방향 및 축방향 출력분포 계산
 - 국부출력밀도 및 핵비등이탈율 계산

[핵심요약]

4. 제어봉집합체연산기 기능

○ 입력신호

- 73개의 제어봉집합체 위치신호

○ 신호 처리

- 부 그룹내의 제어봉집합체 편차에 대한 페널티 계수 계산
- 다음 정보를 노심보호연산기로 전송
 - 부 그룹 편차 페널티 계수
 - 원자로출력 급감발신호(RPCS) 발생 정보
 - 제어봉 집합체 편차 형태 및 제어봉집합체연산기 고장 정보

원자력교육원

참 고 문 헌

명 칭	저자명	출판사	인용부분 및 페이지 수	기타
<ul style="list-style-type: none"> - 표준형원전 FSAR - 표준형원전 System Description - 기기공급사 Manual 	한수원(주)	한수원(주)	전체	
원자력교육원				

교재개발관리이력

원저자 : 김동혁 등 8명 최초개발 : 2004년 01월 최초제작 : 2004년 01월

[illegible]

원고작성(개정)자명단

개정 번호	편	장	절	과 목 명	작 성 자	
					원저자	개정자
0		1	1	1차계통 개요	김동혁	--
		2	1	원자로냉각재계통	박용식	--
			2	원자로용기 및 내장품	박영돈	--
			3,4	제3절 연료 집합체 등	윤준구	--
			5	안전감시계통	김동혁	--
		3	1	화학 및 체적제어계통	박용식	--
			2,3	제2절 기기냉각수계통 등	조성득	--
			4	연료저장 및 취급계통	윤준구	--
		4	1	공학적 안전설비 개요	김동혁	--
			2	격납용기계통	박영돈	--
			3,7	제3절 안전주입계통 등	박용식	--
			4,5	제4절 정지냉각계통 등	조성득	--
			6	보조급수계통	조현철	--
		5	1	발전소보호계통	심종보	--
			2	노심보호연산기(CPCS)	조승우	--
1		1	1	1차 계통 개요	김동혁	허 욱
		2	1	원자로냉각재계통	박용식	김배주
			2	원자로용기 및 내장품	박영돈	김배주
			3	연료 집합체	윤준구	채희동
			4	제어봉 집합체	윤준구	채희동
		3	1	화학 및 체적제어계통	박용식	이혜복
			2	1차 기기냉각수계통	조성득	윤종길
			3	1차 기기냉각해수계통	조성득	윤종길
			4	연료저장 및 취급계통	윤준구	윤준구
		4	1	공학적 안전설비 개요	김동혁	허 욱
			2	격납용기계통	박영돈	허 욱
			3	안전주입계통	박용식	허 욱
			4	정지냉각계통	조성득	허 욱
			5	격납용기 살수계통	조성득	허 욱
			6	보조급수계통	조현철	윤종길
		5	1	발전소보호계통	심종보	고병무
			2	노심보호 연산기계통(CPCS)	조승우	고병무

교재이름 : 원자력계통기초 I (표준형) [계통기초-1]

등록번호 : 2007-1276-0004

발행기관 : 한국수력원자력(주) 원자력교육원

교육기획부 ☎(051) 726-6341~3

초판발행 : 2004년 01월 [개정0]

08판발행 : 2008년 03월 [개정6]

인쇄기관 : 공란(인쇄시 자동 기입 됨)