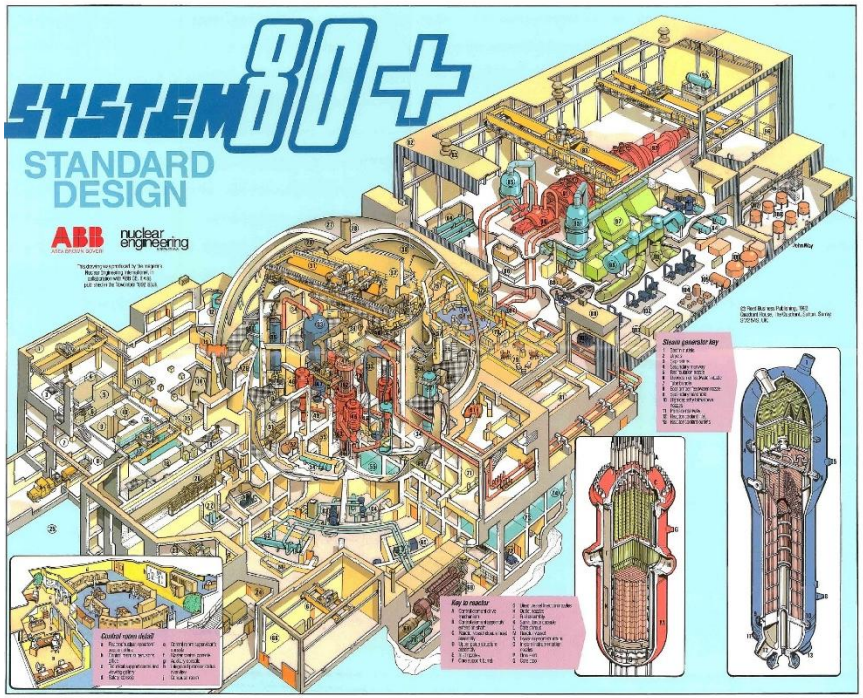
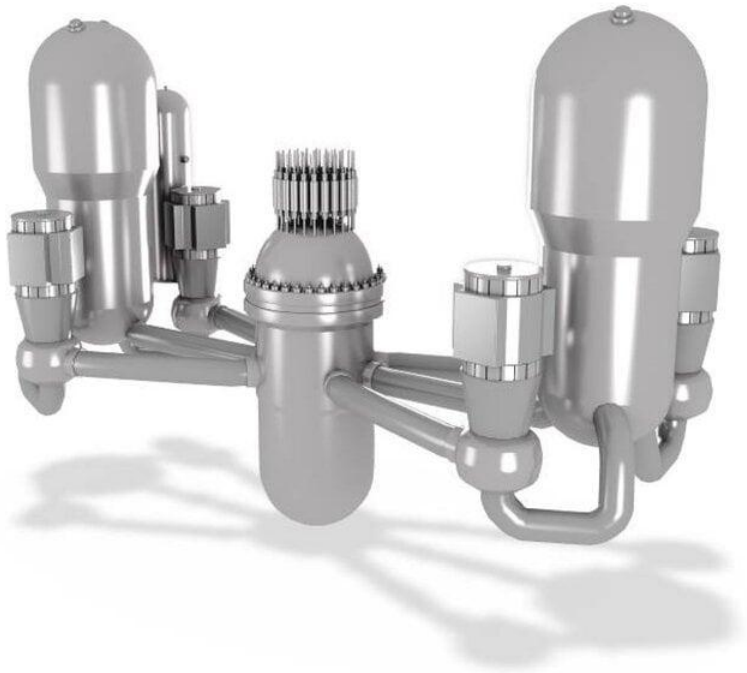
원자력계통공학: 계통 및 구조

Part 1



경북대학교 에너지공학부 박해균
hkyunp@knu.ac.kr

KYUNGPOOK NATIONAL UNIVERSITY



원자로 냉각재 계통

Reactor Coolant System (RCS)

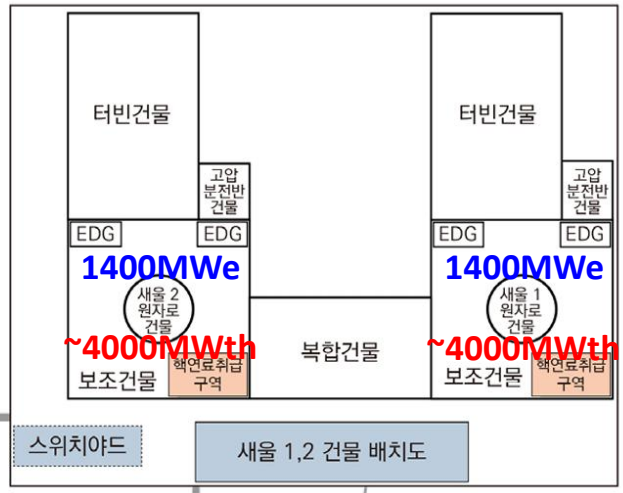
가압경수로(Pressurized Water Reactor)

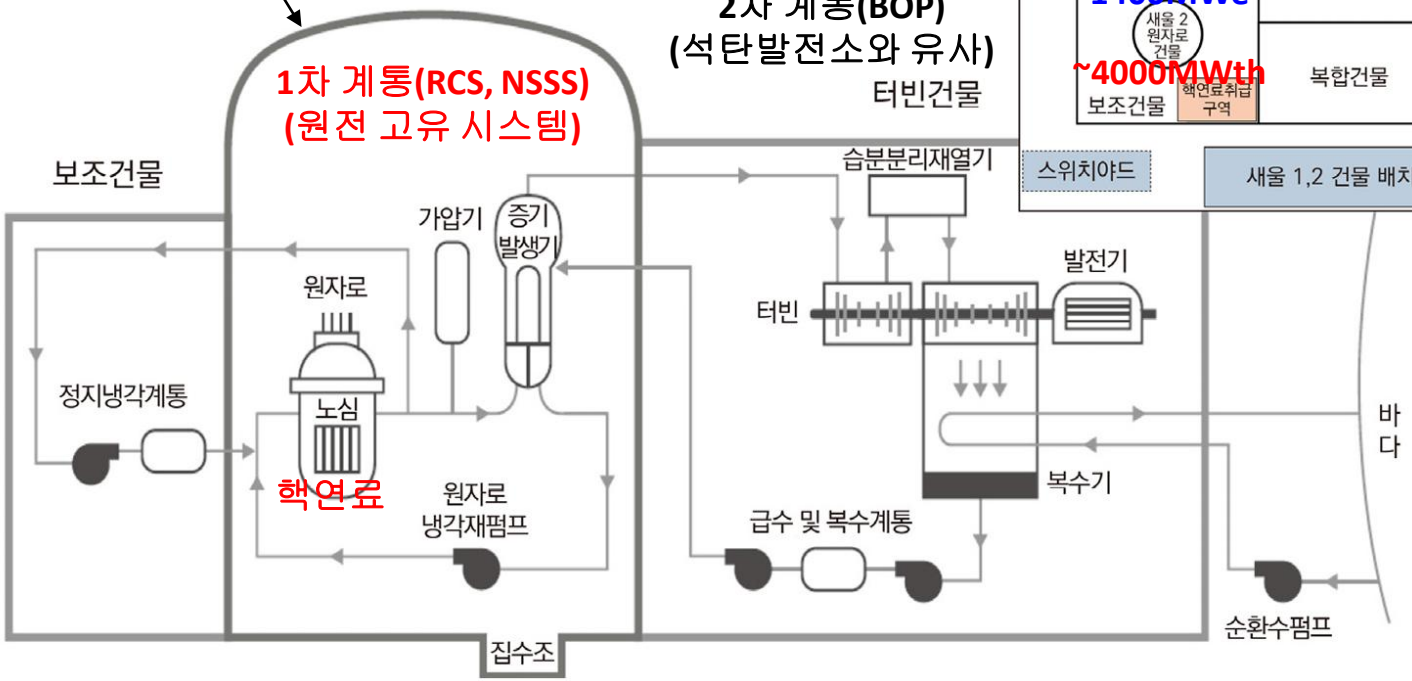
PWR 일반



두께 1.2m
(철근콘크리트)

새울 1발전소(원자로 2기)





RCS and NSSS

정의

- 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission)



Home ▸ NRC Library ▸ Basic References ▸ Glossary ▸ Reactor coolant system

Reactor coolant system

"원자로의 열에너지를 제거하고 증기 터빈으로 직/간접적으로 에너지를 전달하는 계통"

The system used to remove energy from the reactor core and transfer that energy either directly or indirectly to the steam turbine.

안전 관점의 계통 경계

Page Last Reviewed/Updated Tuesday, March 09, 2021

Nuclear steam supply system

The reactor and the reactor coolant pumps (and steam generators for a pressurized water reactor) and associated piping in a nuclear power plant used to generate the steam needed to drive the turbine generator unit.

Page Last Reviewed/Updated Tuesday, March 09, 2021

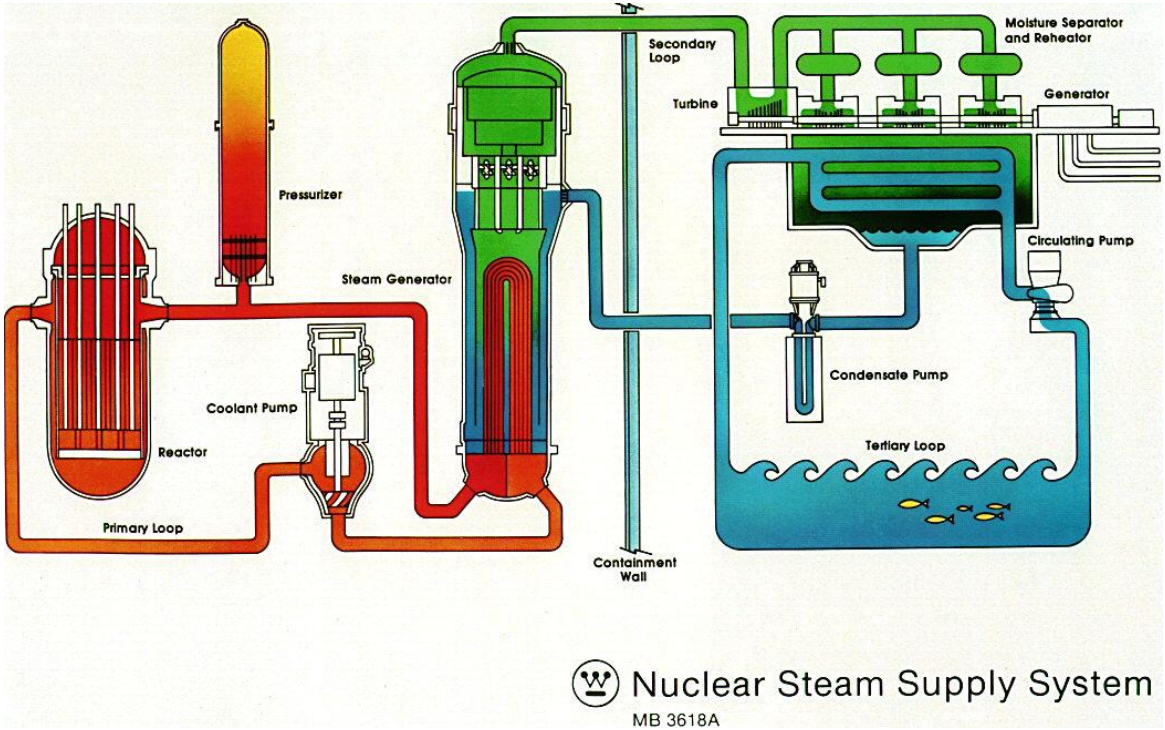
"터빈 발전기를 구동시키기 위한 증기를 생산하는 원자로, 냉각재 펌프(**PWR**의 경우 증기발생기) 그리고 이와 관련한 파이프"

구성 기기 관점
= 2차 계통 일부 포함

Overview

RCS Consists of…

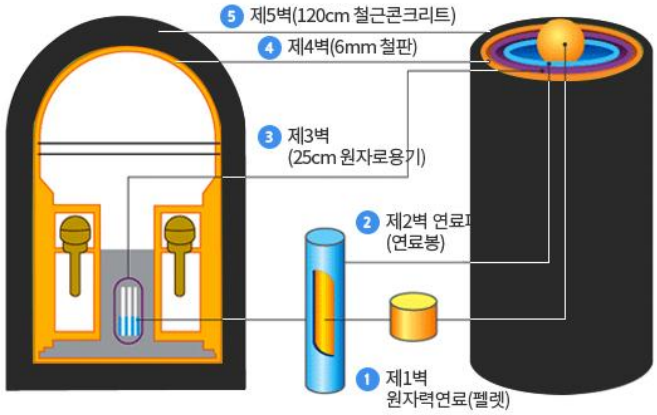
- 원자로용기(Reactor vessel, RV)
- 증기발생기(1차측)
- 냉각재 순환 폐쇄회로(배관)
- 원자로냉각재 펌프(Reactor Coolant Pump, RCP)
- 원자로용기 출구 배관에 연결된 가압기 등



Overview

Role of RCS

- 원자로의 노심과 내부구조물로부터 열을 제거하고 주증기계통으로 전달
- Fuel과 Cladding에서 빠져나올 수 있는 핵분열 생성물의 추가 확산을 억제
- 발전소의 모든 운전모드에 대해 충분한 노심냉각으로 Fuel의 심각한 손상 방지
- 압력제어 능력 제공(Spray, RCS 감압)
- 기기제어 능력 제공(CVCS, SIS)
- 반응도제어 능력 제공(CEA, 보론농도, SIS)
- 안전감압
- 비상 RCS 감압(중대사고)

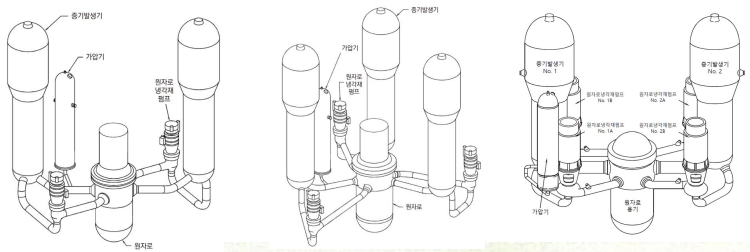


1 제1벽 원자력연료(펠렛)
2 제2벽 연료피복관(연료봉)
3 제3벽(25cm 원자로용기)
4 제4벽(6mm 철판)
5 제5벽(120cm철근콘크리트)

원전의 심층방어(Defense in Depth, DID) 개념 중: 5단계의 물리적 다중방벽

Overview

계통 운전 환경

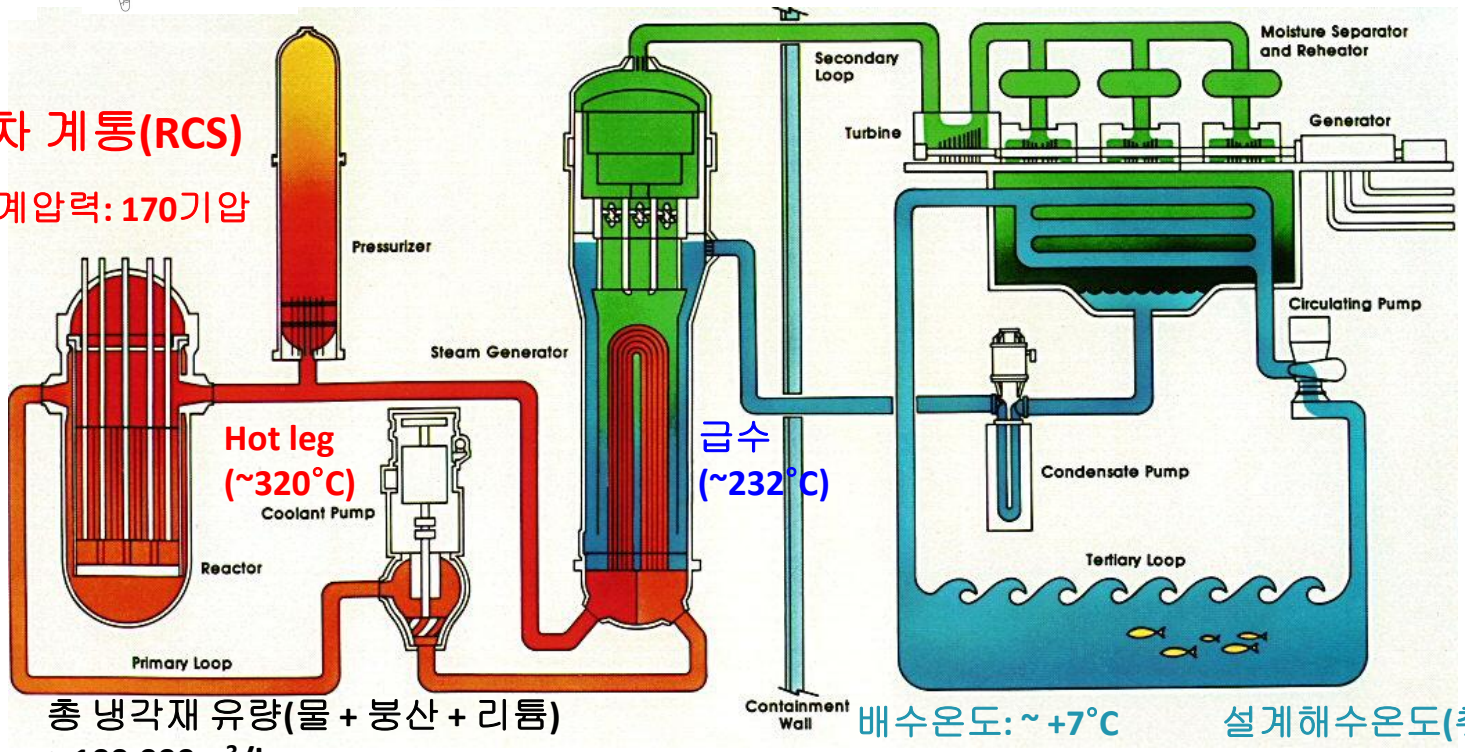


2차 계통(BOP)

설계압력: 80기압

포화증기

(~290°C, 시간당 5–8천 톤)



1차 계통(RCS)

설계압력: 170기압

배관 내경

70–100cm

Cold leg

(~290°C)

급수

(~232°C)

총 냉각재 유량(물 + 붕산 + 리튬)

~ 100,000m³/hr

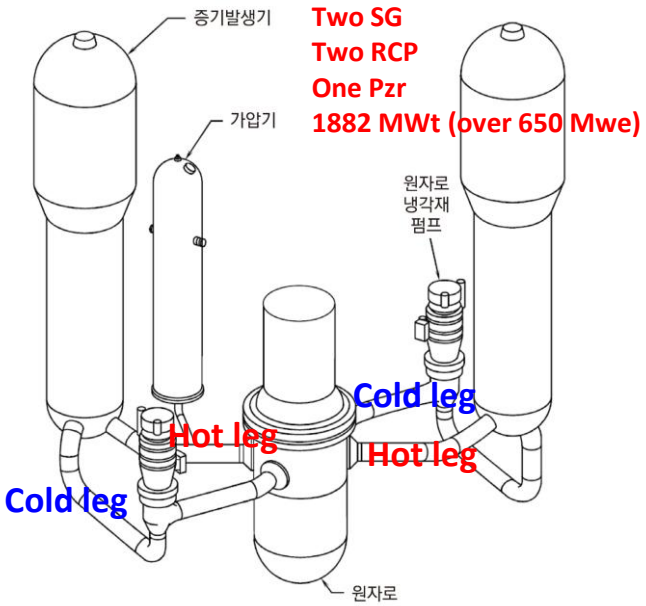
배수온도: ~ +7°C

설계해수온도(취수): 31–36°C

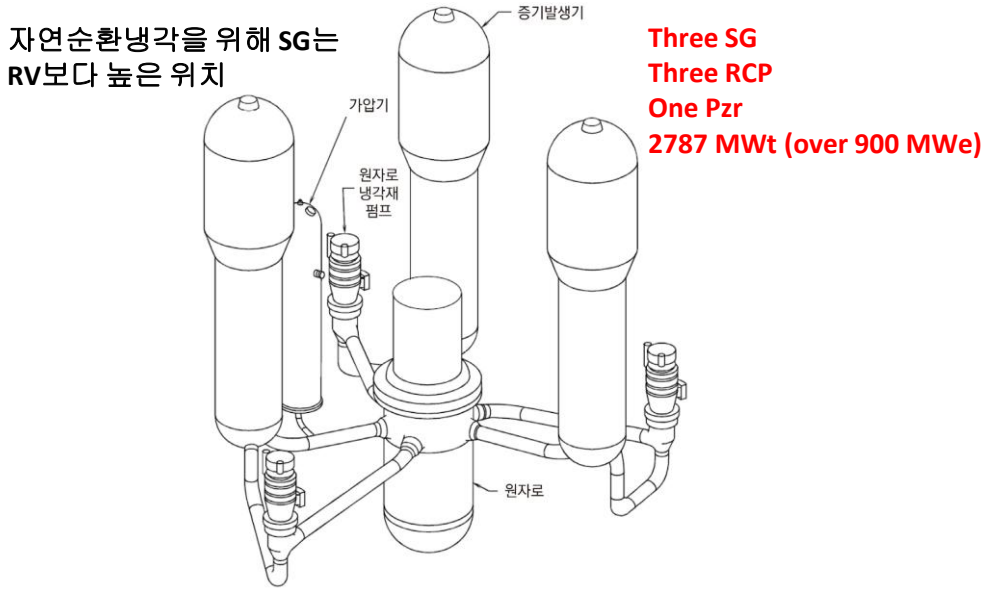
Different Loop System of RCS

Types of RCS

- 동일한 기능을 지닌 기기로 구성되지만 공급자나 출력용량에 따라 설계가 다름
- 웨스팅하우스(WH): 600–1280 MWe급 원자로
  - 원자로에서 SG로 열전달되는 Loop 수: 2-Loop, 3-Loop, 4-Loop
  - 단일 SG는 대략 300 MWe의 전기출력을 감당하도록 설계
  - 우리나라의 경우 2-Loop(고리 1, 2호기), 3-Loop(고리 3, 4 및 한빛 1, 2호기)
  - 한울 1, 2호기: 프랑스 프라마톰, But WH가 원형(3-Loop)



2-Loop RCS (WH)

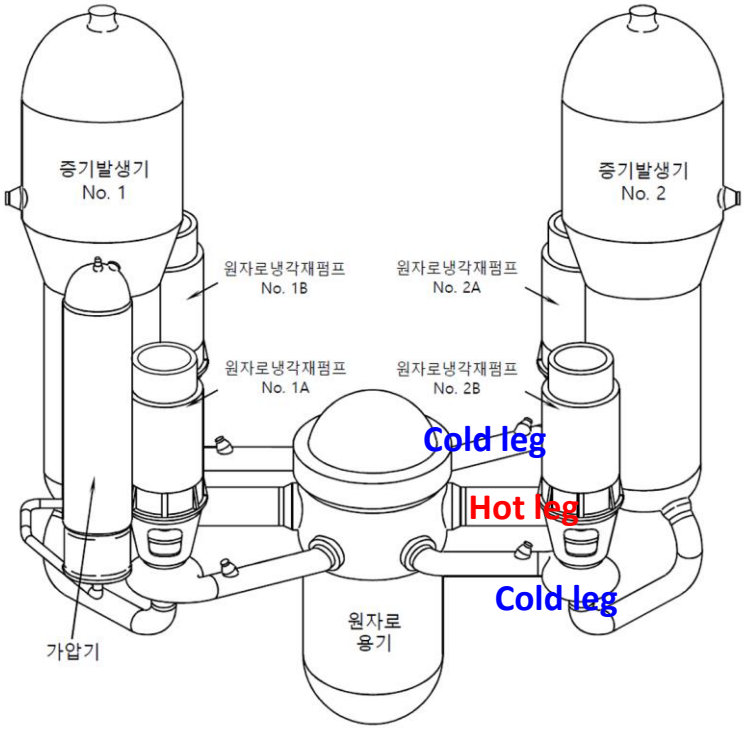


3-Loop RCS (WH)

Different Loop System of RCS

Type of Reactor Coolant System (RCS)

- 동일한 기능을 지닌 기기로 구성되지만 공급자나 출력용량에 따라 설계가 다름
- 컴버스천엔지니어링(CE)
  - 발전출력에 따라 SG의 용량을 변경하는 전략
  - 우리나라 한빛 3, 4호기 및 이후 OPR-1000과 APR-1400: CE system 80이 원형



2-Loop RCS (CE System 80+)

Two SG
Four RCP
One Pzr

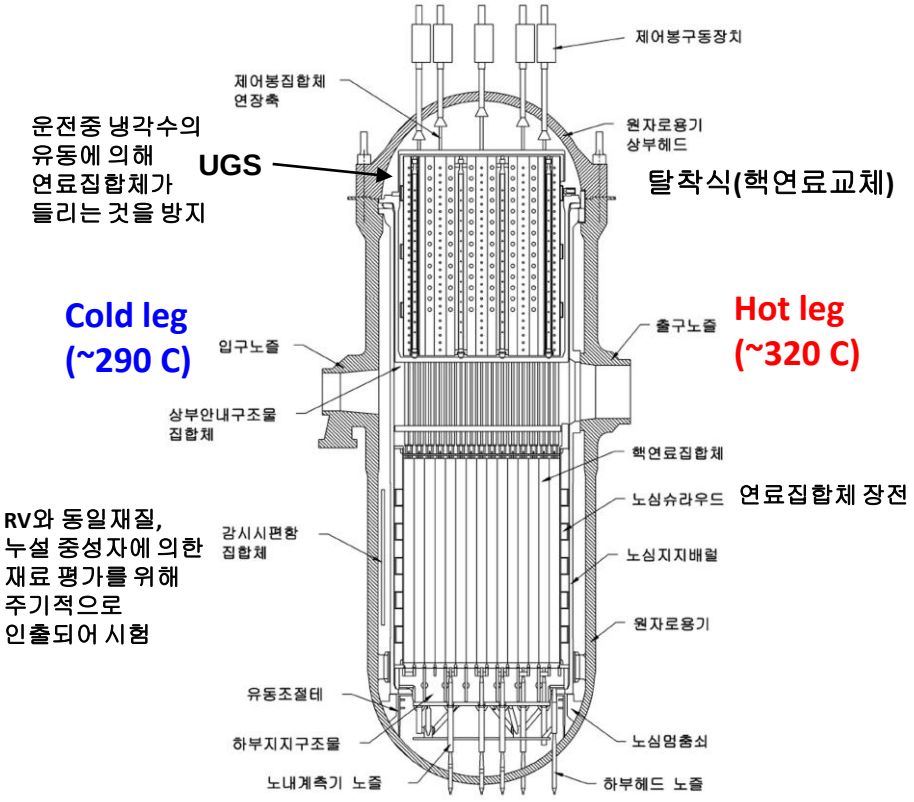
OPR-1000: 2825 MWt (over 1000 Mwe)
(한울 3, 4 / 한빛 5, 6 / 신월성 1, 2)

APR-1400: 3983 MWt (over 1400 Mwe)
(새울 1, 2)

원자로 용기

원자로 용기(Reactor Vessel, RV)

- 핵분열에 의한 열에너지 생성을 위한 핵연료봉집합체, 제어봉집합체, 내부구조물 등
  - 탄소강(중성자와 감마선에 견디기 위함)
  - 안쪽면은 부식방지를 위해 스테인리스강 피복



RV of APR1400

내부구조물(Reactor Vessel Internal, RVI)

- 노심과 연관된 모든 내부 지지물과 부속기기
  - 노심지지배럴(Core Support Barrel, CSB)
  - 상부안내구조물(Upper Guide Structure, UGS)
  - 하부지지구조물(Lower Support Structure, LSS)

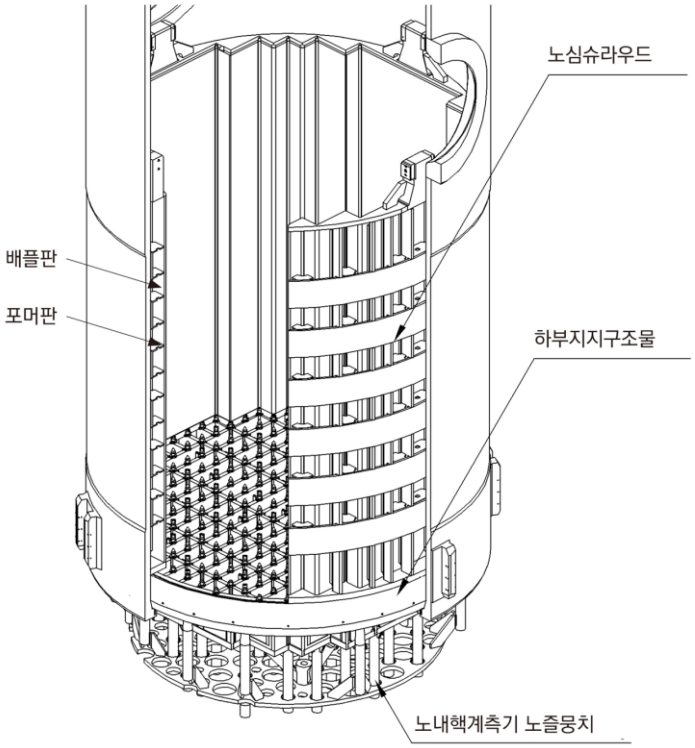
냉각재의 여정

- 저온관으로부터 입구노즐을 통해 CSB와 부딪히며 원자로로 유입
- CSB에 부딪힌 냉각재는 RV 벽과 CSB 사이의 공간을 따라 하강(Downcomer)
- RV 바닥에 도달 후 유동방향이 상부로 전환
- 핵분열에 의한 열제거를 위해 모든 연료집합체 통과
- 노심에서 빠져나온 고온의 냉각재는 Upper plenum에서 출구노즐을 통해 고온관으로 빠져나감

원자로 용기

원자로 노심(Reactor Core)

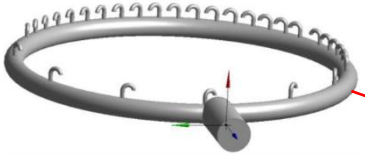
- 연료집합체(Fuel Assembly)는 CSB 안쪽에 설치된 노심슈라우드 내 격자형으로 장전
- 노심슈라우드는 수직판(Baffle)과 수평판(Former)으로 구성
  - Former: 노심외곽 연료집합체를 통과하는 물의 속도를 줄여 기계적 건전성 유지
- CSB와 노심슈라우드 사이의 물은 RV를 조사하는 중성자의 밀도를 저감



증기발생기

증기발생기(Steam Generator, SG)

- 관의 내측(Tube side)을 흐르는 RCS와 동체 측(Shell side)을 흐르는 급수(Feedwater) 간의 열교환을 발생
- 232 °C의 Feedwater를 공급, 1070 psia 포화증기 발생(289.4 °C)
- U-tube: 5000–8200개, Inconel 600(or 690, Ni-Cr-Fe alloy)

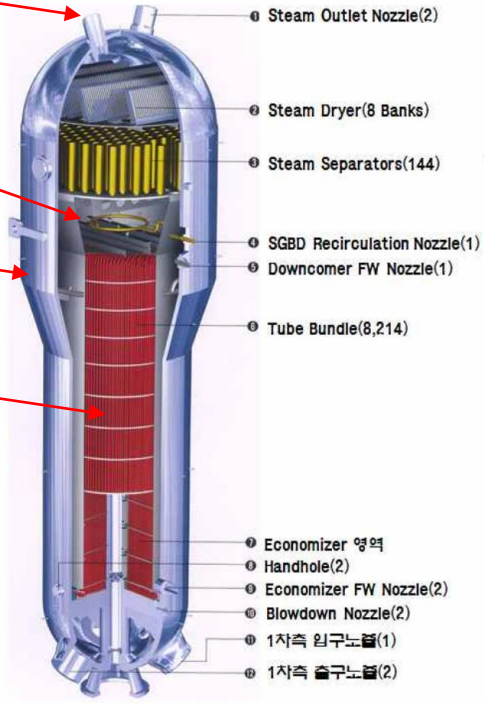


Feedwater ring
(80% hot leg)

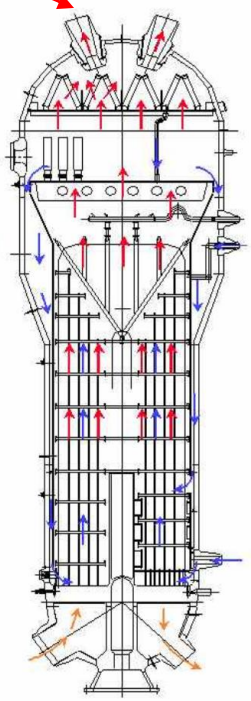
99.75 w% steam

탄소강

외경 **3/4”(19.1 mm)**
두께 **~ 1 mm**
인코넬



출구노즐(차압 유량측정 및 유량 제한)





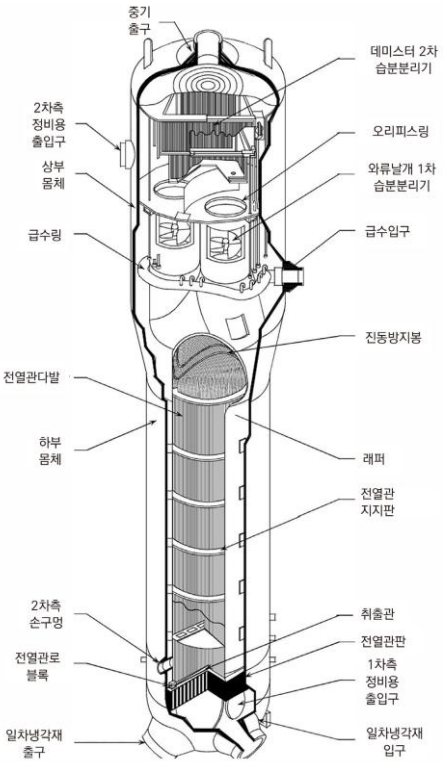
Downcomer
- 전체 급수 유량(출력 **20%** 이하)
- **10%** 유량(출력 **20%** 이상)

Economizer(대향류 형성)
- 닫힘(출력 **20%** 이하)
- **90%** 유량(출력 **20%** 이상)

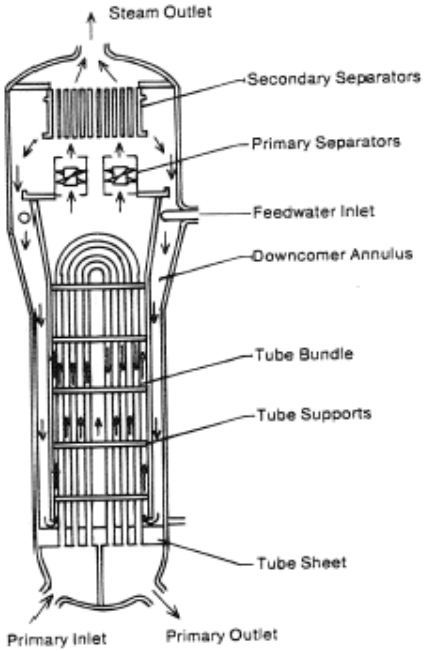
증기발생기

증기발생기(Steam Generator, SG)

- 습분분리장치
  - 두 단계로 구성되어 증기의 습분을 제거하여 급수로 돌려보냄
- 원자로정지 이후 초기에 핵분열생성물에 의한 붕괴열을 제거하는 역할
  - 정지 직후 붕괴열은 총 열출력의 5–7 %에 달하다가 점차 감소



WH model F SG



Flow circulation of SG

SG 구조

- 예열기(Economizer)를 포함하는 수직 재순환 U 튜브
- 약 8200개 U 관다발이 용접
- 하부헤드는 수직판으로 분리(열전달 전/후 냉각재)
- 다운코머 급수와 예열급수(2군데)

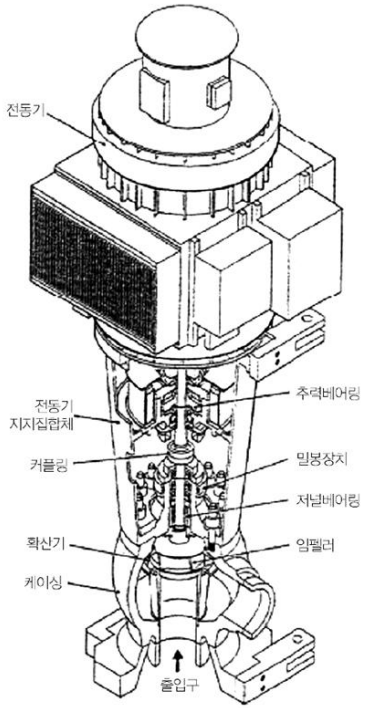
냉각재와 급수의 여정

- (냉각재) RV를 빠져나와 SG의 전열관 내부를 통과
- (Downcomer 급수) 전열관다발 상부의 증기분리기에서 분리된 물은 전열관 외곽의 Downcomer를 따라 하향, 재순환
- (Economizer nozzle) 복수기로부터 공급되어 전열관에서 비등, Mixture 상태로 상향

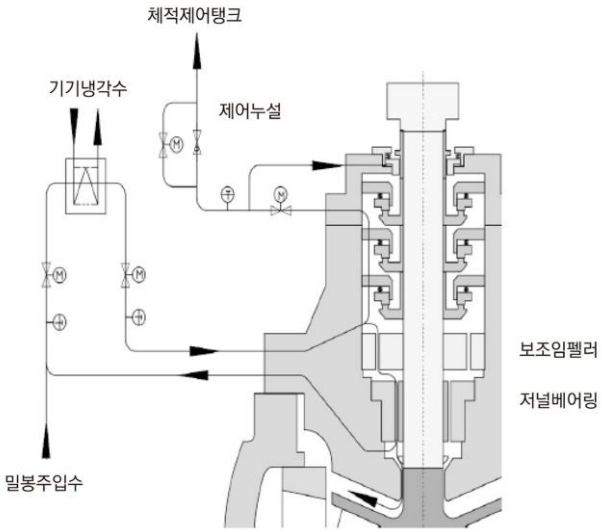
냉각재 펌프

원자로냉각재펌프(Reactor Coolant Pump, RCP)

- RCS의 냉각재를 강제유동시키며 Cold leg에 설치
- 원자로 기동 시 임계에 도달하기에 앞서 냉각재온도를 상온에서 임계최저온도 이상 상승시킴
- RCP 자체 발생열은 총 열출력의 0.3% 이상
- 관성바퀴는 전동기 전원 상실 시 RCP의 감속 정지 시간을 지연, 노심 냉각 수행



RCP



APR1400 RCP 밀봉

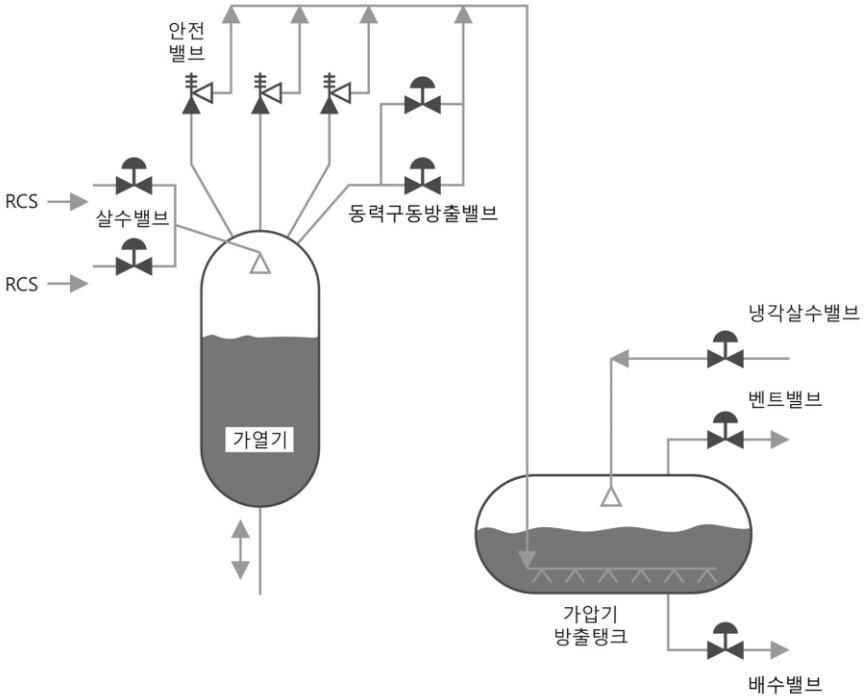
밀봉장치

- 냉각재가 격납건물 내부로 유출 방지
- 3개의 밀봉장치 이용(3단)

가압기

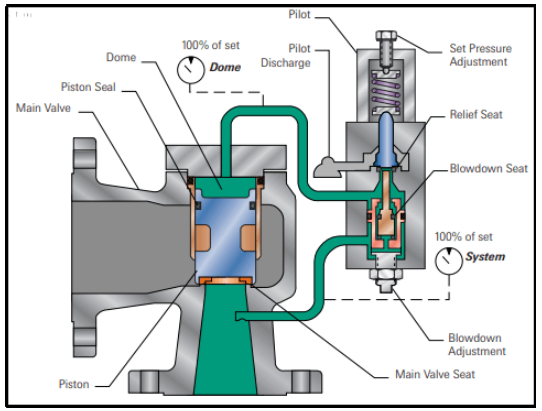
가압기(Pressurizer, Pzr)

- 계통 압력을 제어(운전상태가 바뀔 시 체적변화를 보상)
- 평형 상태의 증기와 물의 혼합물 상태에서 운전
- 정상범위에서 벗어나면 가열 or 살수(RCP 출구 측 Cold coolant 이용)
- 상부에 안전밸브 설치, 과압시 방출
  - (과압조치 순서) 살수 → PORV(Pilot Operated Relief Valve) → 안전밸브



밸브

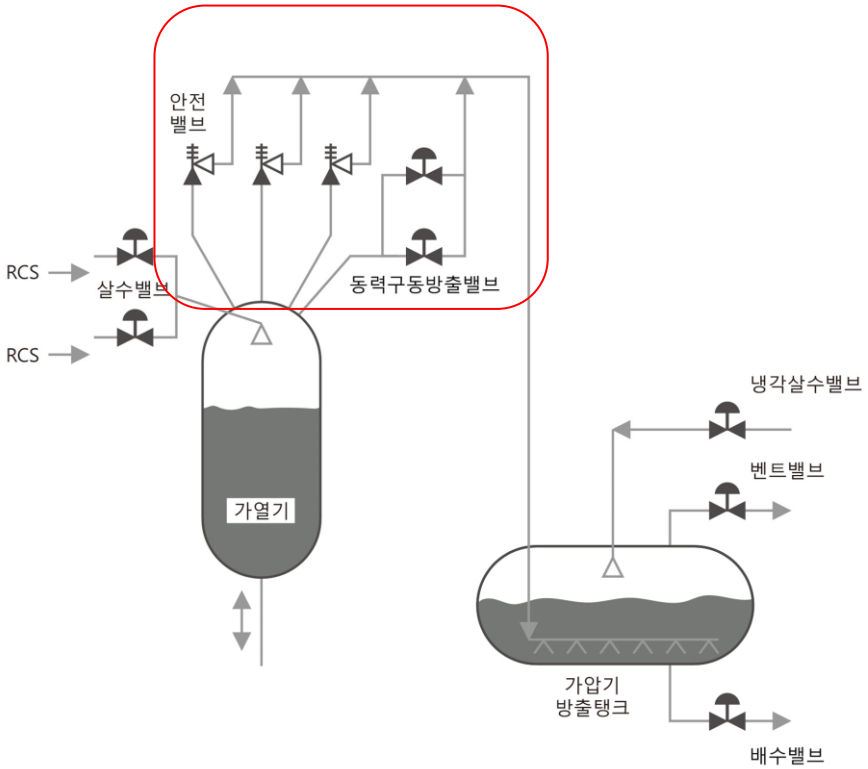
- 전통적인 CE 설계에서는 안전밸브만 설치
- 한빛 3, 4호기에는 사고에 대비, 안전감압계통(Safety Depressurization System, SDS) 추가
- APR1400에는 감압밸브와 안전밸브 기능 동시에하는 POSRV(Pilot Operated Safety Relief Valve) 설치



관련 계통

안전감압계통(Safety Depressurization System, SDS)

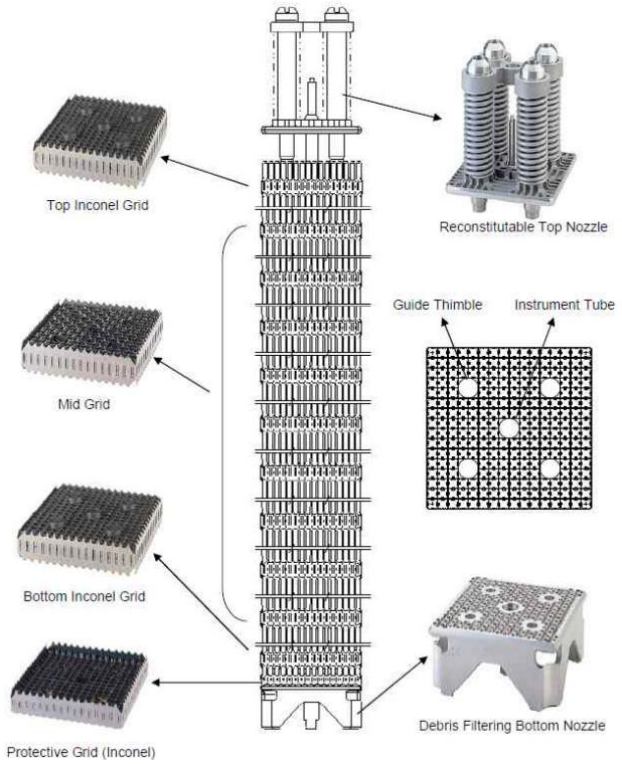
- 2차측에 공급되는 주급수 및 보조급수가 완전히 상실되면 RCS의 압력 증가
- SDS를 이용하여 RCS의 압력을 수동으로 감압시켜야 함
  - 안전주입계통(Safety Injection System, SIS)을 활용하기 위함

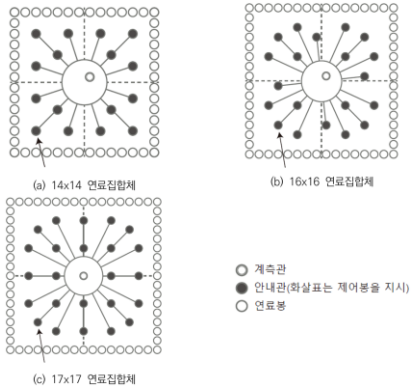


핵연료집합체

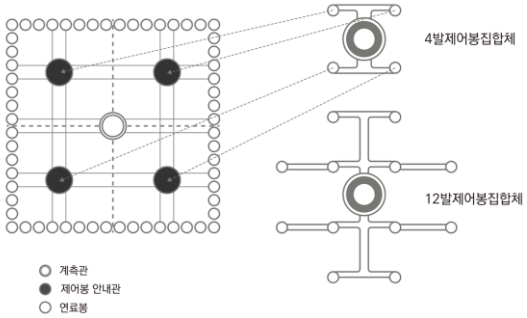
핵연료집합체(Fuel Assembly)

- 발전소의 어떠한 운전조건에서도 냉각수가 노심의 열을 제거해야하므로 핵연료집합체의 기하학적 형상은 유지되어야 함
- 제어봉을 삽입 및 인출할 시 과도한 접촉마모가 발생하지 않아야 함
- 노심 내 중성자속을 감시하는 설비 및 중성자 발생원이 설치될 수 있어야 함





WH 모델



APR1400

연료봉(Fuel Rod)

- 핵연료 펠렛과 피복관
- 지르칼로이-4 재질의 관 모양(피복)
  - 중성자 흡수단면적 작음
- 헬륨기체로 가압
- 2200°F(1200°C) 이상에서는 Cladding과 물이 반응하여 성능 저하

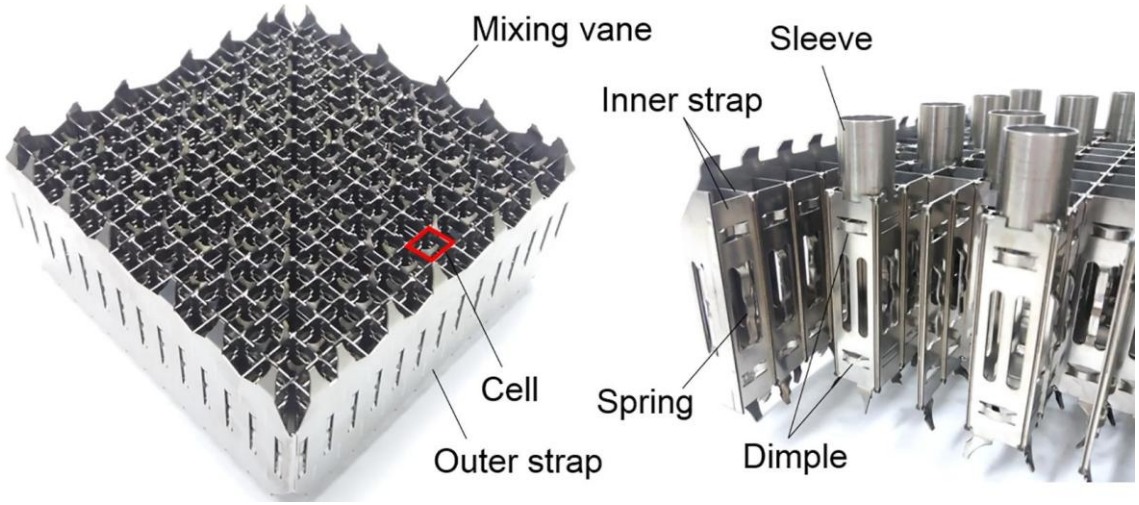


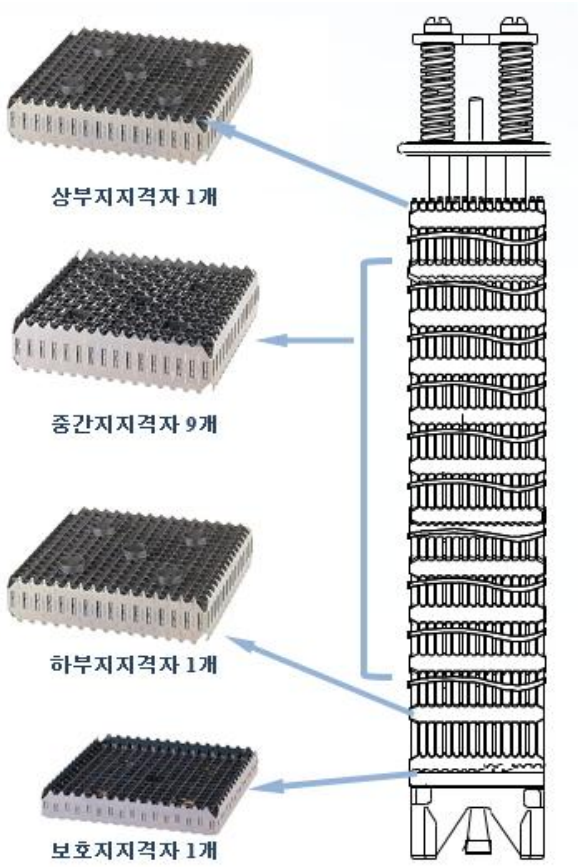
핵연료 펠렛(Pellet)

핵연료집합체

지지격자(Spacer Grid)

- 냉각재의 유동에 따른 핵연료의 축방향 움직임을 억제
- 난류유동을 발생시켜 열전달 증진(Mixing vane)





PLUS7(OPR-1000 and APR-1400)

핵연료집합체

<u>제어봉집합체(Control Element Assembly, CEA)</u>

- 핵연료집합체 안내관으로 삽입
- 핵분열의 단기 반응도 제어를 담당(평소에는 빠져있음)
  - Shutdown: 전강도 제어봉집합체
  - 출력담당: 부분강도 제어봉집합체
- B_4C and Inconel 625, 10년 수명 설계
- 제어봉구동장치(Control Element Drive Mechanism, CEDM)는 자력식인양구조

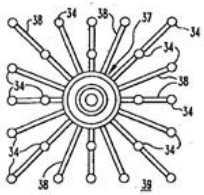


FIG.2B

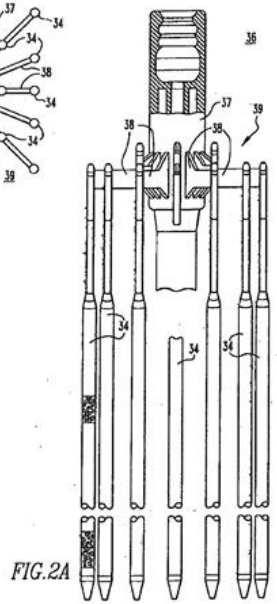
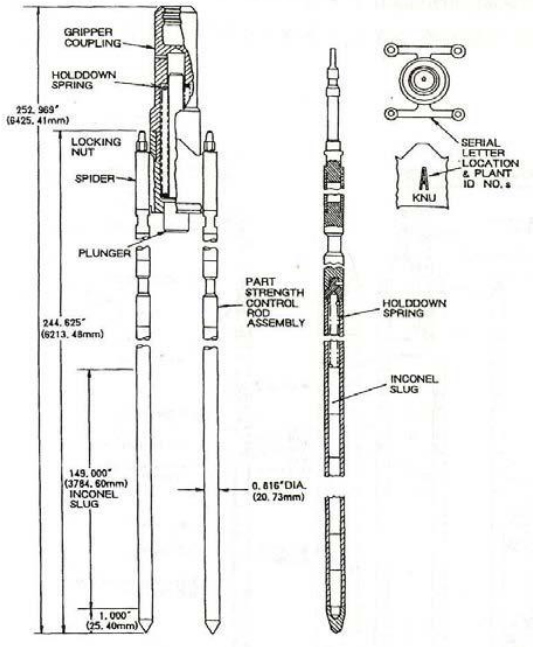


FIG.2A



추기계통

터빈추기계통 개요

- 터빈사이클의 효율 증가를 위해 증기발생기로 유입되는 급수의 온도를 증가
- 1개의 개방형(+탈기기능), 6개의 밀폐형 급수가열기(OPR-1000)

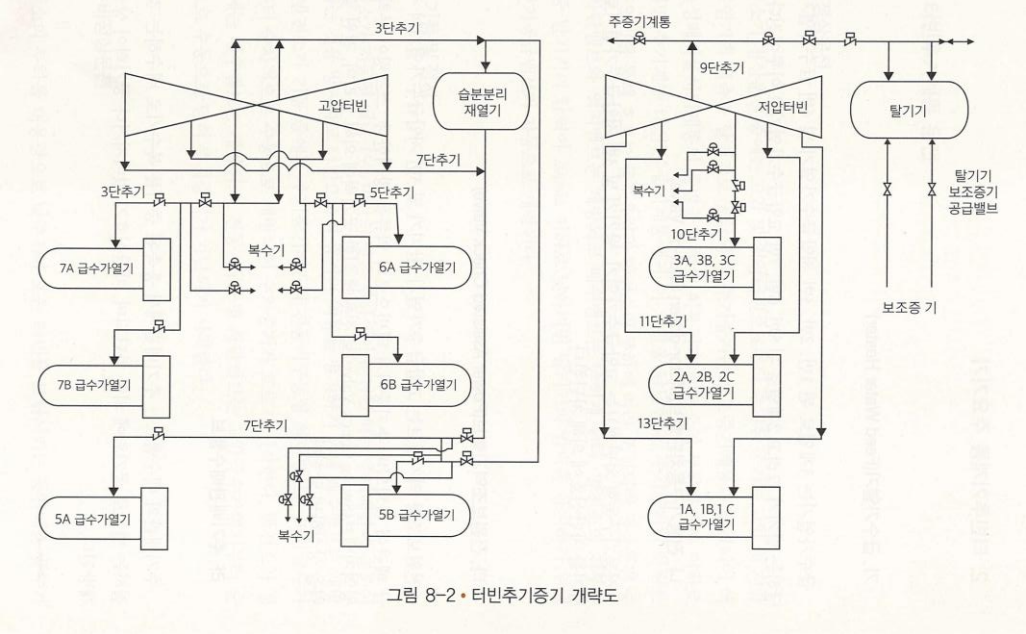
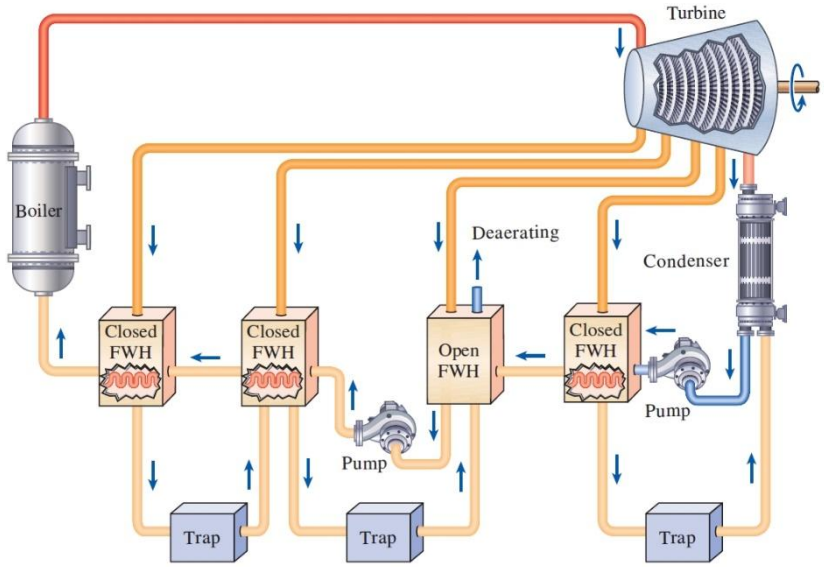


그림 8-2 • 터빈추기증기 개략도



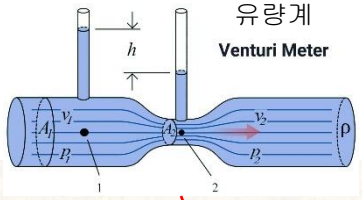
주급수계통

주급수계통 개요

- 증기발생기로 공급되는 급수의 유량, 온도, 압력 및 수화학을 제어/공급
- 탈기기의 저장탱크로부터 급수를 받아 SG로 공급



펌프 Cavitation 방지 위한 승압





주급수 차단밸브, MFIV(main feedwater isolation valve)
- 다운콤마, 이코노마이저 급수 배관 설치 (유압 개방, 스프링 닫힘)
- 주증기 차단신호 시 닫힘

급수제어밸브, FWCV(main feedwater control valve)
- 다운콤마, 이코노마이저 급수 배관 설치(공기구동)
- 전기/공기력 상실 시 현 개도 유지

주급수펌프, MFWP(main feedwater pump)
- 터빈구동, 병렬 설치(원심펌프)

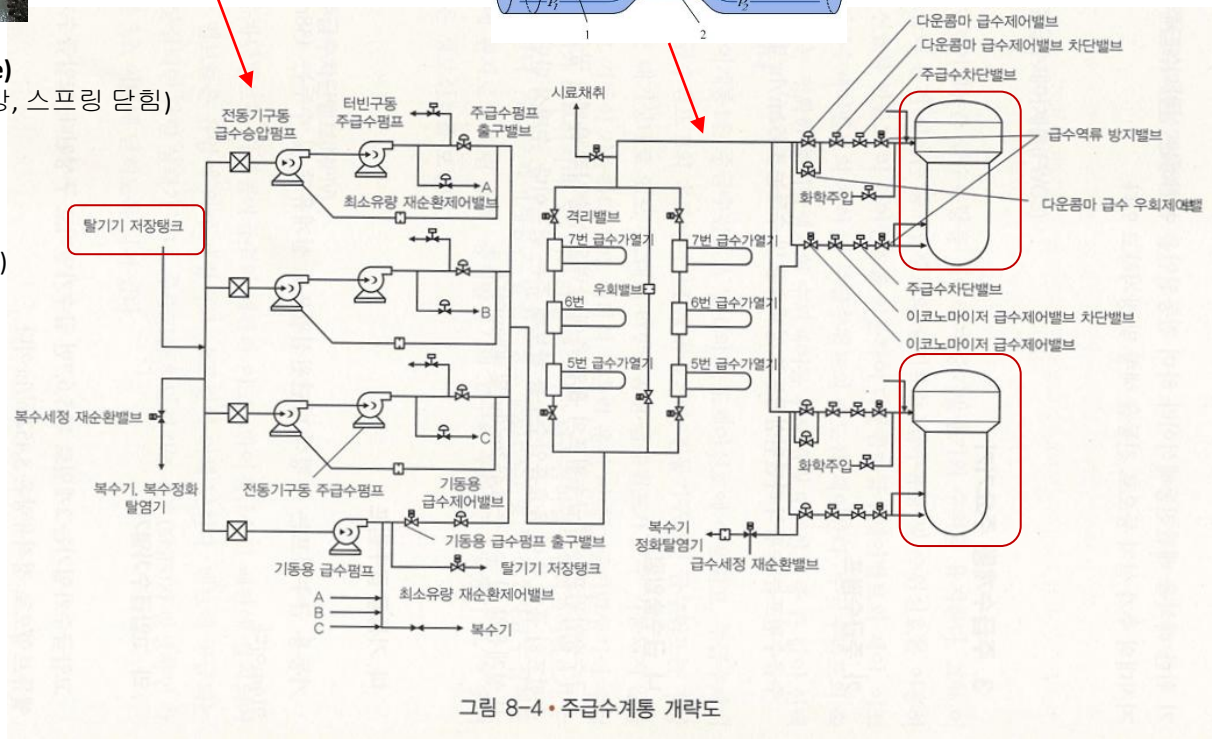


그림 8-4 • 주급수계통 개략도

주증기계통

주증기계통 개요

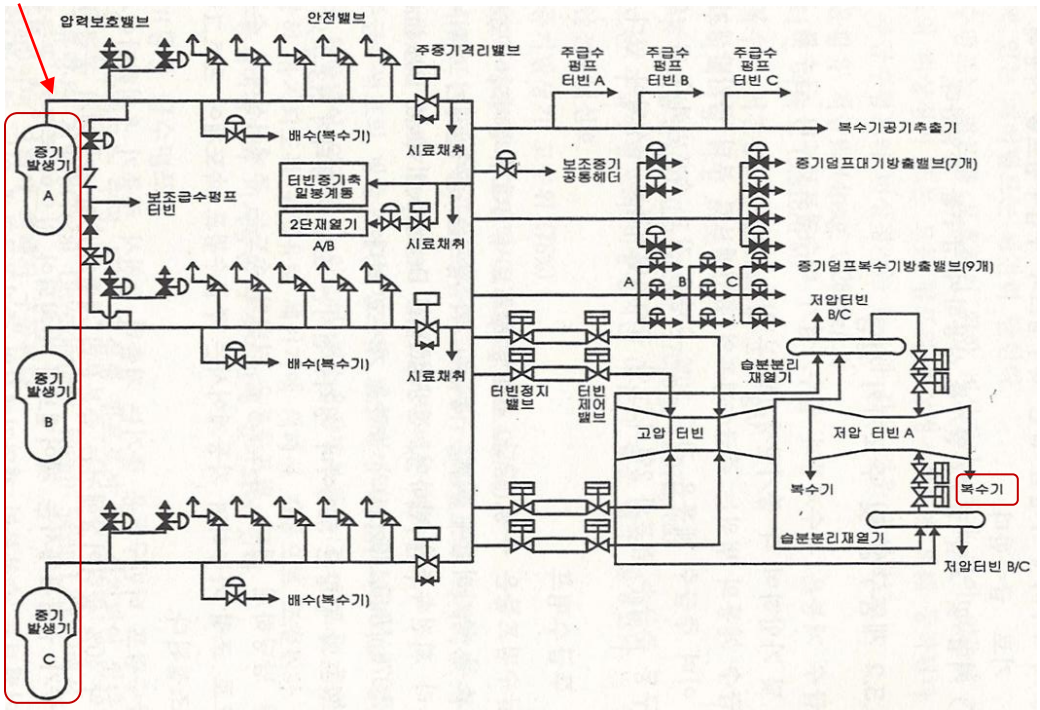
- SG에서 생성된 증기를 터빈/발전기 계통과 보조계통으로 전달
- 주증기배관, 주증기대기방출밸브, 주증기안전밸브, 주증기격리밸브 및 터빈우회밸브 등 구성

30 inch 대구경 배관(압력강하 최소화)

주증기 차단밸브, MSIV(main steam isolation valve)
- 주증기배관에 설치(상/하류 파단 시 수 초 이내 닫힘)
- 전원상실 시 닫힘
- 수동 닫힘 가능

주증기 안전밸브, MSSV(main steam safety valve)
- 원치 않는 증기압력 상승 시
- 스프링 작동 안전밸브

주증기 대기 방출밸브, MSADV(main steam atmosphere dump valve)
- MSIV가 닫혀있거나 복수기가 열제거원 역할 못할 시
- 노심 붕괴열 제거 위해 충분한 양의 증기 방출
- 수동 작동



복수계통

복수계통 개요

- 터빈에서 배출되는 증기를 응축, 복수계통에서 가열 → 급수계통 이송
- 가열, 탈염기(정화), 수질개선, 탈기 등

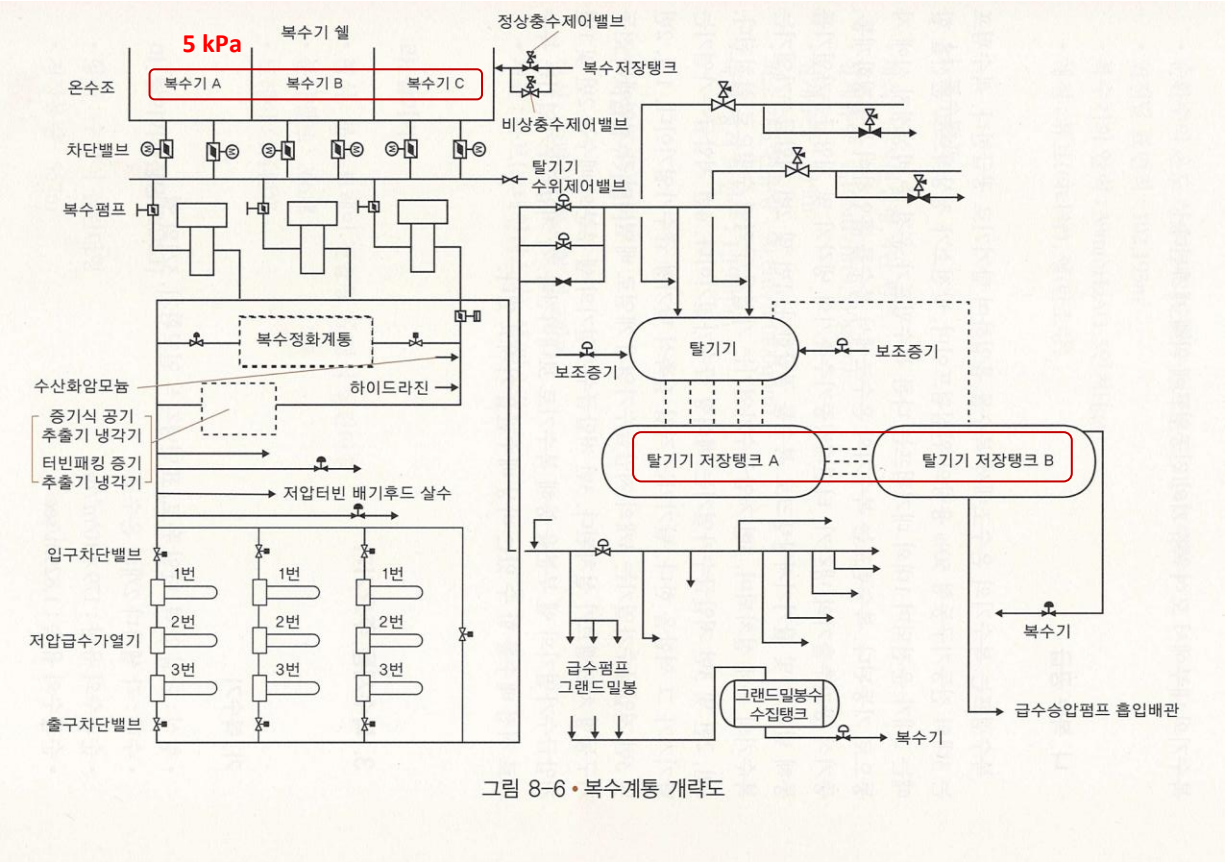


그림 8-6 • 복수계통 개략도

증기발생기취출수계통

증기발생기취출수계통 개요

- SG에 공급되는 Feedwater 수질 개선
  - 용해성, 비용해성 불순물 및 부식 생성물 제거 → 화학약품주입 및 복수탈염기

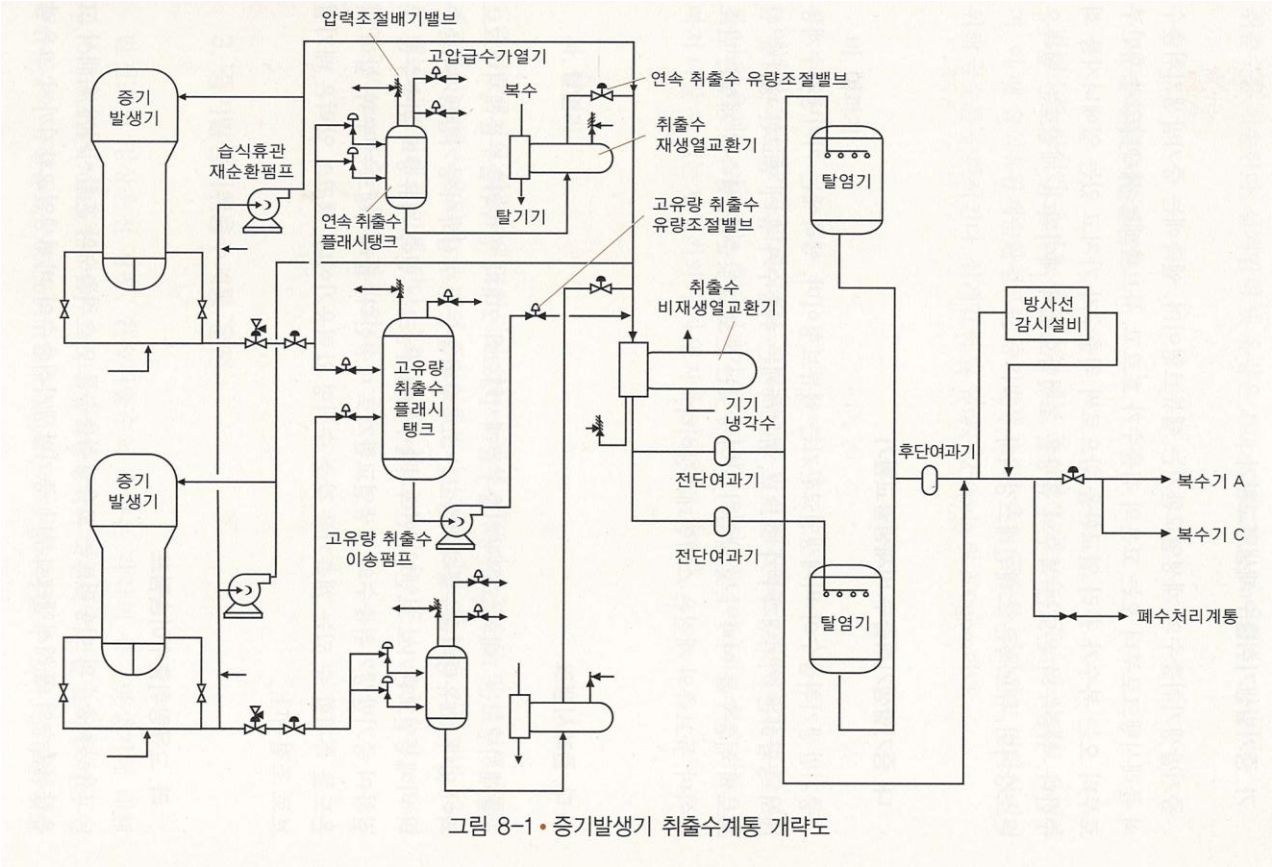


그림 8-1 • 증기발생기 취출수계통 개략도

화학 및 체적 제어계통

Chemical and Volume Control System (CVCS)

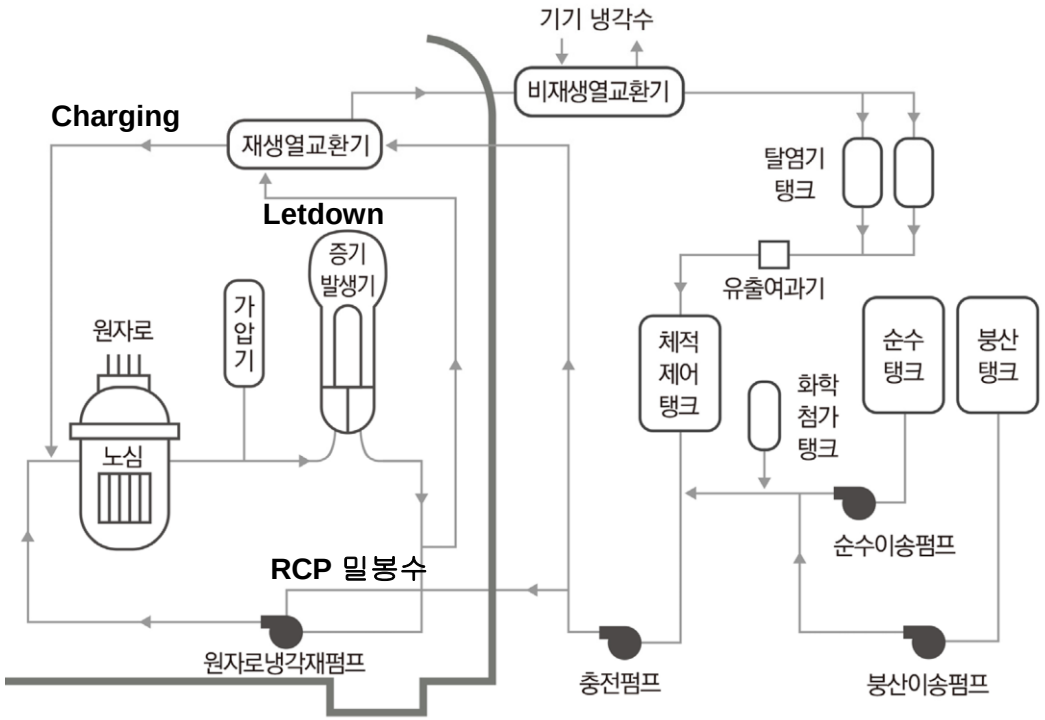


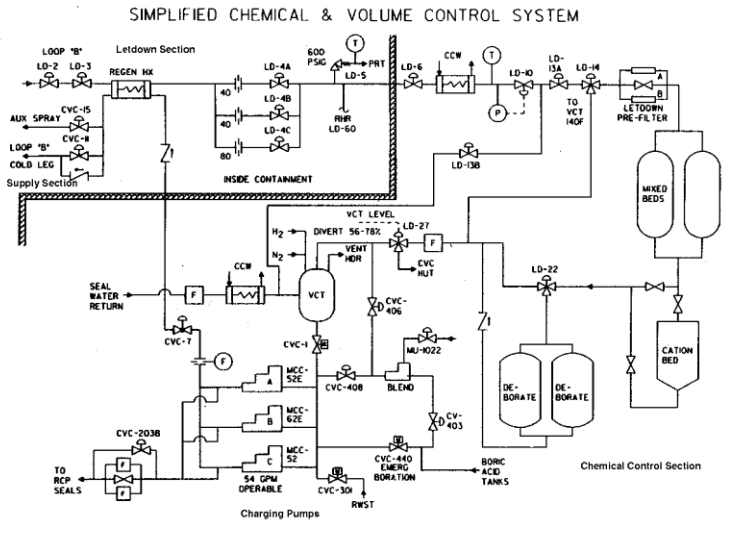
화학 및 체적제어 계통

화학 및 체적제어계통(Chemical and Volume Control System, CVCS)

- 냉각재의 순도, 체적 및 붕소 농도(반응도)를 조절

  - RCS 재고량 유지: 충전(Charging)-유출(Letdown) 유량 조절 → 가압기 수위 제어
    - ✓ 유출: 기동 및 출력 증가 시(온도 증가에 따라 RCS 체적 팽창 보상)
    - ✓ 충전: 정지 및 출력 감발 시(온도 감소에 따라 RCS 체적 수축 보상)



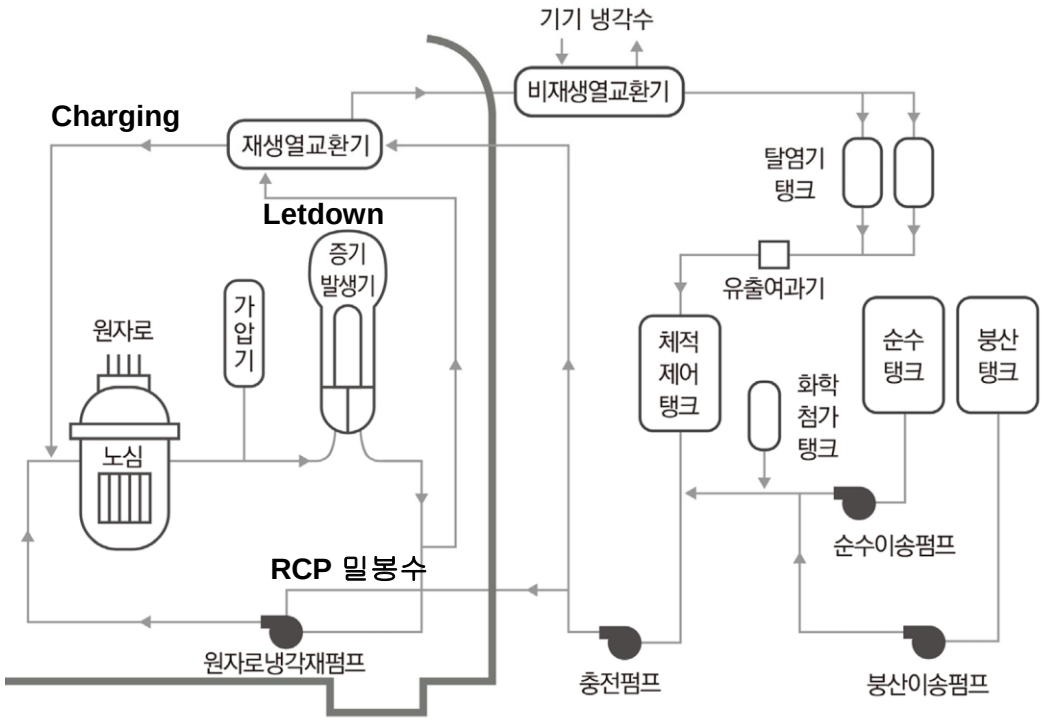


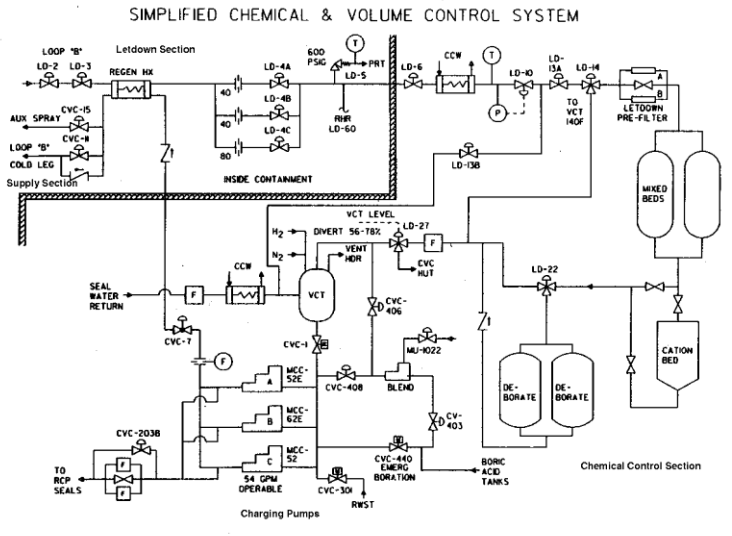
화학 및 체적제어 계통

화학 및 체적제어계통(Chemical and Volume Control System, CVCS)

- 냉각재의 순도, 체적 및 붕소 농도(반응도)를 조절

  - RCS 화학 및 순도 유지
    - ✓ 용존산소 제거: 부식 방지
    - ✓ pH 조절: Li 농도(염기)를 조절하여 적정 pH 유지
    - ✓ 수질 관리: 여과기, 이온교환기 등 통해 불순물, 입자, FP 제거

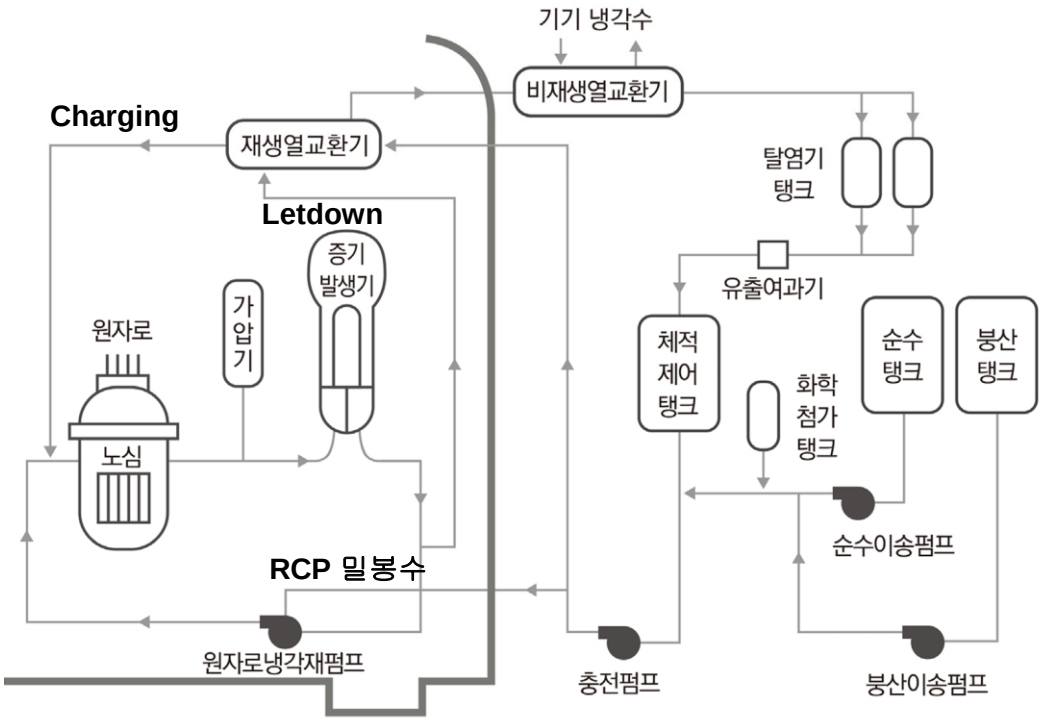


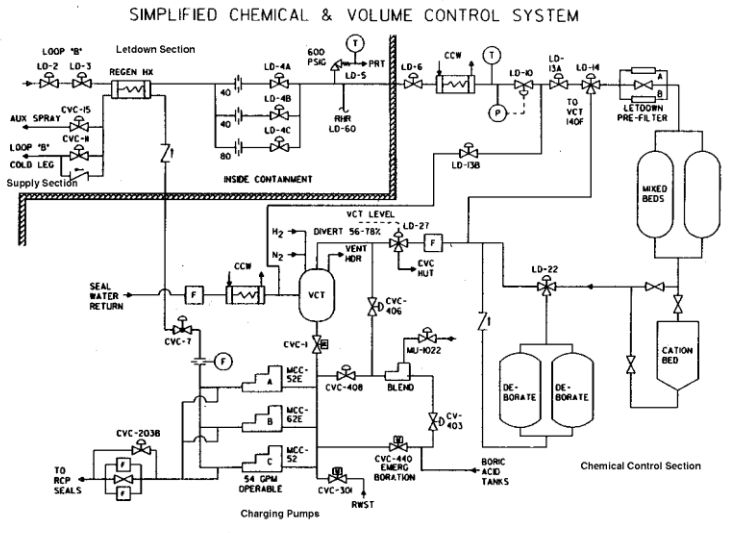


화학 및 체적제어 계통

화학 및 체적제어계통(Chemical and Volume Control System, CVCS)

- 냉각재의 순도, 체적 및 붕소 농도(반응도)를 조절
  - 원자로 출력제어
    - ✓ 붕소농도를 조절하여 출력을 제어(물 또는 고농도 붕산수 활용)



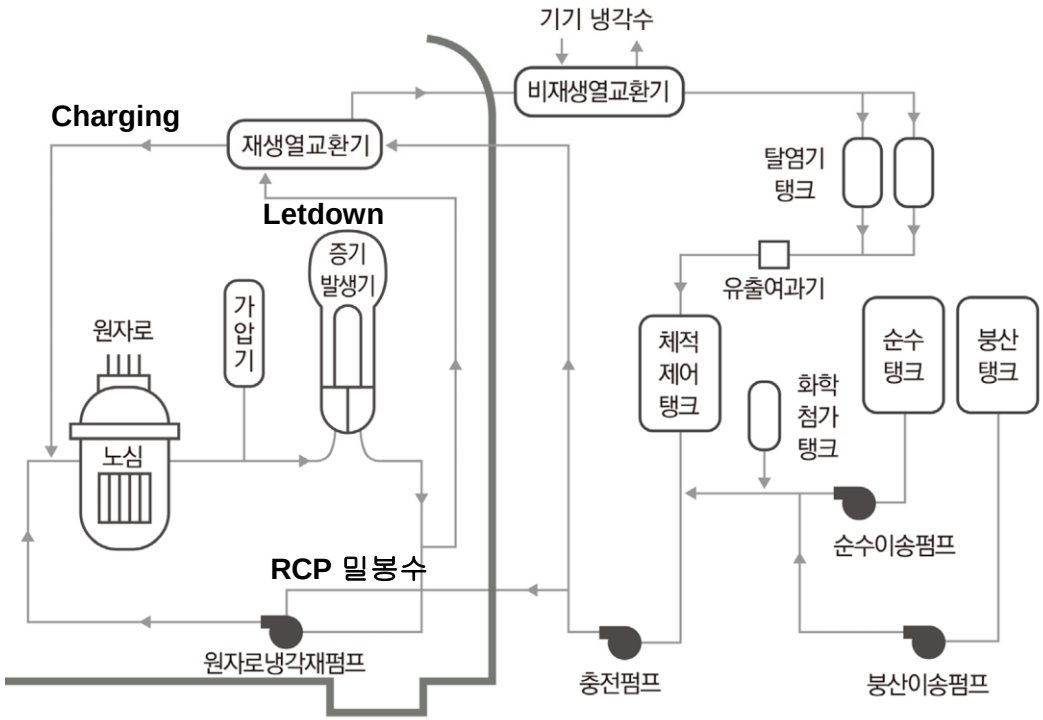


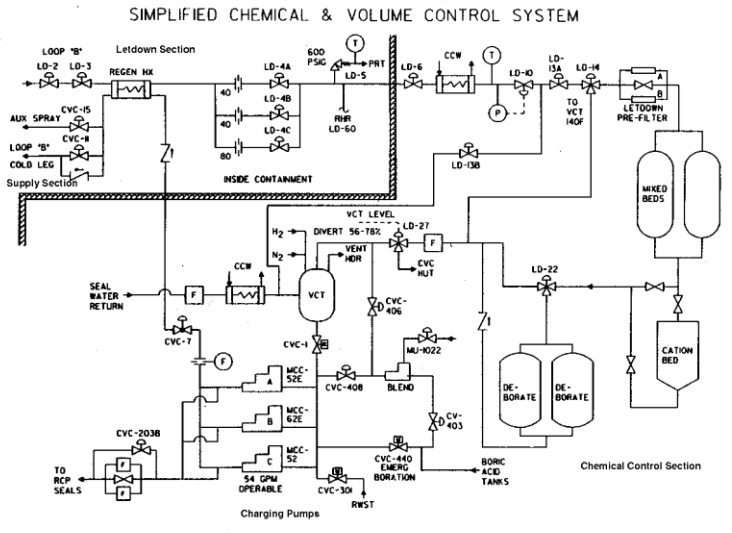
화학 및 체적제어 계통

화학 및 체적제어계통(Chemical and Volume Control System, CVCS)

- 냉각재의 순도, 체적 및 붕소 농도(반응도)를 조절

  - RCP 밀봉수 공급(+ RCP 냉각 및 방사성 침전물 최소화)
  - RCS 붕소농도 측정
  - RCS 방사능 감시(FP): 유출관에 설치된 감시기를 통해 RCS의 감마선 감시
  - RCS 누설 감시(충전펌프로 RCS 설계 압력까지 가압하여 누설시험 수단 제공)





화학 및 체적제어 계통

화학 및 체적제어계통(Chemical and Volume Control System, CVCS)

- ^{10}B는 매우 강력한 중성자 흡수체 → 제어봉과 Chemical shim에 사용

Chemical Shim

- 주기 초: 잉여반응도 큼(Fresh fuel) → 약 2,000ppm
- 주기 말: 많이 연소 됨(재장전 직전) → 0ppm 가까움
- 붕소 농도가 낮으면?(붕소희석사고): 열중성자 흡수 감소 → 반응도 및 출력 증가
- 붕소 농도가 높으면?: 양의 감속재계수(Positive MTC)를 가질 수 있음(붕소 밀도 감소)



