

경수로 중수로 및 고온가스로의 특성비교

〈 下 〉

차 증 회

한국원자력연구소 열유동연구실장

연료채널 아셈블리는 연료와 중수냉각재가 들어 있으며 양단에서 단부 차폐체와 lattice tube에 의하여 지지되며 Calandria tube내부에 위치하고 있다.

end shield는 원자로 운전중 차폐역할과 연료교환구역에 대한 섯다운 차폐역할을 한다. 각 단부 차폐체의 한쪽단은 콘크리트 보일트 벽내에서 시멘트에 묻힌 링에 의하여 직접 지지되어 있고 다른 끝은 Calandria용기에 붙혀 있다.

중수감속 반사체는 Calandria 외각의 서로 대향측에 있는 4개의 노즐중 2개를 통하여 유입되고 Calandria 저부의 2개를 통하여 유출하도록 되어 있다.

Calandria는 파열판(rupture disc)의 형으로 된 압력개방장치 가 마련 되어 있는데 Calandria 정부(頂部)에서 4개의 관이 Calandria 보일트내 차폐경수를 통하여 Shielding deck에 있는 파열판으로 연결되어 있다.

감속재는 Calandria 내의 중수와 증수를 순환시키기 위한 감속재펌프와 열교환기로 구성되어 있다.

감속재 주 회로는 순도 99.5%의 중수를 940l/s의 유량으로 순환시키며 Calandria로의 감속재 입구 온도를 43°C, 출구 온도를 71°C로 잡고 전냉각용량이 120MWt가 되도록 되어 있다.

핵연료체에서 핵분열에 의하여 발생하는 열은 1차 열전달계 내에서 증수에 의하여 이동된다. 이 장치는 원자로의 양단에서 노심을 수평으로 관통한다. 여러개의 압력판과 연결된 인접 압력

관이 서로 대향류(對向流)인 2계통의 투우프에 의하여 구성된다.

열수송계통의 주요 콘포넌트는 380개의 노연료 채널, 4기의 수직보일러, 4기의 전동펌프, 4기의 노입구 헤더 4기의 노출구 헤더, 1기의 전기가열가압기, 모든 필요한 상호연결 배관 및 밸브로 구성된다. 이 투우프는 2계통으로서 각 투우프는 냉각재 유출 feeder관과 유입출 헤더, 보일러(2기), 냉각 재순환 펌프(2대), 유입출헤더와 유입 feeder으로 구성된다. 연료 채널인 압력관은 중수로에서는 경수로의 압력용기구실을 한다. 이 관은 직경이 약 10cm이고 두께가 4.34mm, 길이가 6.36m인 크기이며 그안에 핵연료가 들어가고 냉각재가 흐르며 보통의 운전조건에서 압력이 약 1630~1449 psia, 온도가 511~594°F의 상태에 있다. 냉각재는 원자로 양측에 있는 유입측 헤더로 부터 각유입 feeder 관을 통하여 원자로 연료 채널로 공급된다. 각 채널을 지난 냉각재는 유출 feeder관을 통하여 유출측 헤더로 수송된다.

원자로 단부에는 380개의 유입 feeder관과 같은 수의 유출 feeder관이 마련되어 있다. 이들 feeder관과 헤더들은 연료교환장치실내에 설치되어 있다.

4개의 냉각재순환펌프는 원심식, 수직형이며 유량 29,400IGPM, 양정 750ft의 용량을 갖는다. 보일러는 4기가 있으며 이들은 증기드럼이 있는 수직U관형이며 증기분리기, 증기드럼, 열교환부 공급수입구, 블로우다운 연결구등으로 되

어 있다.

중수냉각재는 압력이 약 1,400psia 온도 588°F, 4.8% quality의 상프에서 하부에 있는 입구로 유입하며 보일러 세관을 순환 열교환하고 온도 512°F의 상태로 출구관으로 나가며 유량은 60.3×10^6 lb/hr이다. 한편 경수는 368°F의 입구온도로 공급수관을 통해 유입하여 압력 660psia에 대한 포화증기를 발생시키고 증기 분리부에서 질이 75%인 증기로 하여 상부의 증기관에 내 보낸다.

천연우라늄을 사용하는 원자력발전소의 효율적 운전을 위해서는 기민한 연료교환이 필요하다. 그 때문에 가압중수로 에서는 어떤 상태의 출력에서도 연료교환이 가능하도록 연료교환기가 준비되어 있다. 이 연료교환기는 발전소의 가동율, 부하변동, 연료경제, 운전유지의 조건등을 감안하여 용통성있게 사용될 수 있도록 설계되고 운전 프로그램이 마련되어 있다.

연료교환절차는 장치들과 차폐된 실내에 있는 운전사에 의하여 완전히 프로그램이 된 원격조작에 의하여 수행된다.

핵(ram)과 마가진이 장치된 2대의 연료교환기의 헤드는 새연료가 충전된 새 연료 포트에 연결되고 봉해진다. 다음에 기계는 원자로의 연료 채널쪽으로 옮겨지며 헤드는 채널끝에 연결되고 중수가 채워지며 냉각재 압력까지 압력을 높인다.

채널의 누손조사가 있는 다음 헤드는 채널 끝에 있는 밀봉마개와 차폐마개를 마가진 내에 옮겨 넣는다.

새연료는 반대측의 다른 기체가 사용연료를 배출하는데 맞추어 채널로 삼입하게 된다. 다음에 헤드는 마가진속의 차폐마개와 밀봉마개를 원상으로 옮기고 누손검사를 한후 감압하고 채널의 양단으로 부터 분리한다. 사용연료측의 헤드는 사용연료 포트에 연결하여 봉한후 사용연료속은 연료교환기의 중수환경으로 긴급히 배출시킨다.

연료교환기는 애널로그 및 수치전자제산조직의 제어기능을 가지는 넓은 범위의 전기적, 기

계적, 구동장치로 구성되어 있다.

그밖의 차폐냉각 화학제어처리, 중수관리, 증기계통등 부속시설이 마련되어 있다.

4-3. 고온가스냉각로의 구조개요

고온가스로의 구성은 노심, 냉각재순환기, 증기발생기등이 포함된 원자로용기, 제어장치 연료취급장치와 이들을 수용하고 있는 원자로격납용기, 그리고 기타 원자로 서비스등 부속시설 연료저장시설 및 터어빈발전시설등으로 되어 있으며 여기서는 원자로격납용기내의 주요장치의 구조에 대하여 그 개요를 들기로 한다.

1차냉각재계통은 4개의 주 루우프와 2개의 보조루우프로 되어 있다. 이 냉각재계통과 노심은 덕트에 의하여 직접 연결되어 있다. 4개의 루우프는 증기발생기, 증기터어빈구통의 냉각재순환기 및 1차냉각재 셔utoff 밸브(shutoffvalve)를 가지며 2개의 보조루우프의 각각은 보조열교환기, 보조순환기 및 체크 밸브를 갖는다. 냉각재 루우프와 그 콘포넌트는 원자로용기(PCRU)내 캐비티(cavity)에 있으므로 1차냉각재계통과의 경계에는 캐비티 라이나, 관통부 라이나와 뚜껑이 마련되어 있으며 원자로용기는 그 자신의 구조적 지지와 1차냉각재계통의 압력에 견디어야 한다.

원통형의 원자로용기는 1,100MWe(3,000MWt)의 경우 96ft 6in직경, 92ft높이의 크기이며 노심이 들어 갈 중앙의 강철로 라이닝된 캐비티는 44ft 높이, 37ft직경이다. 중앙의 캐비티 주위에는 4개의 작은 캐비티가 있어 증기발생기 및 헬륨순환기가 들어 간다. 이들 캐비티에는 상하 2개의 수평 원통 덕트가 있어 중앙 캐비티와 연결하고 있다.

이들 증기발생기 캐비티중에 2개의 보조 루우프가 들어간다. 원자로용기의 최소벽의 두께는 약 16ft이며 상하의 헤드는 약 18ft두께이다.

노심을 구성하는 6각형 흑연블럭의 크기는 높이 31.2in, 폭 14.2in로서 그 속에 연료봉, 제어봉등이 들어갈 구멍이 수직으로 뚫어지게 된다. 연료요소의 수는 약 2,700개, 한 기둥당의 요소의 수를 8개로 한다면 전 기둥의 수는 약 340개 정도가 될것이다. 노심의 연료부분의 개략적 크

기는 높이가 20ft, 직경이 23ft로 추산된다.

정상운전 1차냉각재인 He은 각 주순환기에 의하여 공급된다. He은 상부 횡단 덕트를 통하여 노심의 상부 플레넘(Plenum)에 유입하여 노심속을 하향으로 유동하면서 가열되어 노심의 하부 플레넘으로 방출된다. 그리고 하부 횡단 덕트를 통하여 각 증기발생부로 들어가며 재열부, 과열부, 증발부 및 예열부를 지나면서 열을 증기발생을 위하여 전달한다. 증기발생부를 지난 He은 원자로용기 캐비티의 열방어벽이 있는 환상 공간을 위로 흘러 순환기 입구로 들어가게 된다. 정상운전시 셋오프 밸브는 열려 있으며 노심보조냉각 루우프는 정지되어 있다.

증기발생기는 탄소강과 Ni합금의 단일 헬리칼 튜브 번들로 되어 있으며 oncethrough, reheat형이다. 증기조건은 압력이 2,400psia, 온도가 950°F이며 재열온도는 1,000°F이다, 전증기 유량은 5.35×10^6 lb/hr이다.

헬리움 순환기는 단단 증기터어빈 구동의 단단 축류 압축기로서 주 구성재료는 martensite스테인리스강이며 1기당 마력은 14,500마력이다. 셋오프 밸브는 원자로 정지중 순환기로부터의 냉각재 역류를 방지하기 위하여 각 루우프에 마련되어 있다.

반응도제어는 쌍으로된 49쌍의 98개의 제어봉을 원자로용기의 정상부에 있는 연료교환용 관통부에 있는 구동장치에 의하여 이룬다. 각 제어봉은 40%의 boron carbide가 함유된 흑연을 Incoloy 800 용기에 넣어 만들어져 있다.

또한 비상시의 원자로 스크램을 위한 예비 제어장치가 독립적으로 마련되어 있는데 비상시 중력에 의하여 노심내에 떨어지게 되어 있다.

정상적 제어봉은 전동식 원치에 의하여 홀레시불한 강선의 연결로 상하 구동하여 조작한다.

원자로 셋다운시의 1차계 잔열제거는 주 냉각계와 노심보조냉각계통(core auxilry cooling system)이 할 수 있다. 노심보조냉각계통은 주 냉각계통이 유용하지 않을때 독립적으로 예상되는 과도현상과 사고시에 원자로 노심의 감쇠열을 제거하도록 설계되어 있다. 이 장치는 2개의분리된 독립적 루우프로 되어 있으며 각 루우프는 하나의 노심보조열교환기, 하나의 보조순환기와 하나의 He체크 밸브로서 구성되며 원자로용기 관통부에 설치된다. 열교환기는 외부에서 공급되는 가압수에 의하여 냉각되며 순환기는 전동식 원심압축기이며 냉각재 역류를 방지하는 체크밸브가 각 순환기의 입구 덕트에 설치되어 있다. 연료취급계통은 고온가스로의 특수성에 따른

표5 각형 원자로의 구조특성 비교

특 성 항 목	P W R	P H W R	H T G R
원자로용기의 형태	금속재 압력용기	금속재 압력관	콘크리트 내압용기
원자로용기의 수	1	380	1
원자로용기의 재료	탄 소 강	Zlircaloy	PS 콘크리트
원자로용기의 크기	132in D, 39ft 1in H	4inD, 35ft 6in L (×380)	*96ft 6in D, 92ft H
노 심 구 조	16×16집합체×121 4각형격자	37봉속	흑연블럭격자
제어장치 구동	전자구동	전 동	전 동
냉각재 순환	강제대류	강제대류	강제대류
냉각재 순환로	29in배관	1.5~18in배관	crossduct
증기발생기형식	수직U튜브	수직U튜브	헬리칼튜브, 재열
펌프, 순환기형식	단단원심식	단단원심식	증기터어빈구동축류압축기
연료교환기구	원격기중기	연료교환기	연료교환기
격납용기구조	강 철	PS콘크리트	철근콘크리트
격납용기의 크기, ft	105D×207H	131D×170H	*126D×230H
격납용기벽두께, ft	2.5	3.6	6
비상노임냉각장치	저, 고압주입장치	중력주입장치	보조냉각장치

* 3,000MWt의 경우

장치가 마련되는데 이것에는 연료 및 반사체를 원자로로부터 제거, 교환하는데 사용하는 연료취급기계, 연료 및 반사체 요소를 연료취급기계와 연료저장장소간을 이동시키는데 필요한 연료이동캐스크(cask), 교환전후에 있어서 제어장치를 이동, 가설하는 보조서어비스캐스크, 연료교환작업중 연료교환관통부를 차폐, 밀폐하는데 필요한 원자로 고립 밸브, 그리고 연료이동 캐스크를 운반할 이동장치(dolly)로서 구성된다. 연료수명이 4년이므로 매년 4분의 1의 연료가 새것과 또는 재사이클을 위하여 교환되며 반사체요소는 8년의 수명을 기준으로 교환한다.

원자로 격납용기(containment)는 3,000MWt의 경우 외경이 126ft, 높이가 230ft의 원통형 철근 콘크리트 구조건물로서 원자로사고에 대한 격납 기능을 가지도록 강판으로 라이닝한 기밀 내압구조이다. 그안에 원자로용기, He 저장탱크, 연료교환시설이 들어가게 된다.

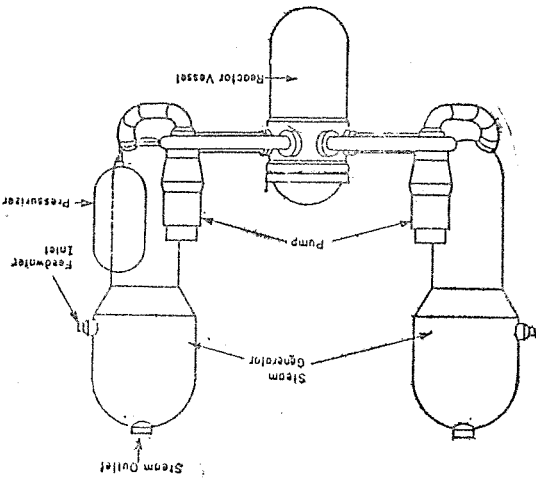


그림 1. PWR 개요도

4-4. 구조특성 비교

가압 경수로, 가압 중수로 및 고온가스로의 구조적 특성을 비교하면 다음표와 같다.

5. 연료의 특성비교

가압형 경수로의 연료는 2~3%의 저농축 우라늄을 UO_2 의 형으로 하여 그 분말을 소결하여

펠레트(pellet)로 한것을 Zircaloy튜브에 넣어 연료봉으로 하여 사용한다. 연료펠레트의 외경은 0.82cm, 길이가 1.35cm이며 이론적 밀도에 대한 제조시의 밀도는 95%이다. 피복재가 Zircaloy-4인 연료봉의 외경은 0.937cm, 길이가 약 365cm이다.

이 연료봉은 다시 4각형배열로 여러개(예컨대 16×16)를 묶어 연료집합체를 만든다. 연료집합체에서 연료봉간의 간격을 일정하게 유지하기 위하여 스페이서 그릿드(grid)가 사용되며 이 원자로에서는 한 집합체에 길이방향으로 일정거리를 두고 7개소 두고 있고 상하부에는 지지노즐을 조합하고 있다.

600Mwe PWR에서는 121개의 연료집합체 노심을 구성하며 노심의 상당직경은 약 247cm이며 연료량은 약 49.7ton이다.

최근 연료성능을 높이기 위하여 소결시의 밀도를 높이고 연료봉내부는 He 가스를 충전하여 465 psi 정도의 압력으로 예비 가압되어 있다. 또 그릿드에는 2개의 스프링과 4개의 dimple 이 있어 연료봉의 열팽창이나 방사선조사성장 이 일어날 경우에도 자유롭게 늘어날 수 있도록 하고 있다.

Linear heat rate는 평균 6.36 KW/ft이다.

Pu recycle을 고려하고 있다.

가압 중수로의 연료는 천연우라늄의 UO_2 형을 사용하고 있다. 따라서 우라늄의 농축과정은 필요없다.

UO_2 분말을 소결하여 이론밀도의 96%밀도, 16mm의 펠레트를 만들어 이를 한쪽 또는 양쪽 단면을 dish를 가지도록 가공하여 29개를 Zircaloy 튜브속에 넣어 연료봉을 만들며 37개의 연료봉이 하나의 연료집합체를 구성한다.

연료봉사이에는 스페이서를 용접하여 수압에 의한 fretting부식을 막고 집합체 외부는 Zircaloy bearing pad를 용접하여 채널 장진시의 마모를 방지하고 있다. 1개의 채널에 12개의 집합체가 들어가며 노심에는 4,560개의 집합체가 장진되어 총 86ton의 무게가 된다.

최근의 연료는 연료피복관 내부에 얇은 흑연층(graphite layer)을 입혀 UO_2 펠레트와 피복관

의 접촉저항을 적게하여 출력변화에 의한 연료 파손을 줄이고 있다.

고온가스냉각로의 연료요소는 6각형단면의 흑연블럭으로서 길이 방향으로 연료삽입공, 냉각재유로공 및 제어봉공의 그릿드를 가지고 있다. 수천개의 이 연료블럭은 기둥으로 쌓아올리고 큰 원통형의 배열로 하여 노심을 형성한다.

연료공에는 두가지 형식 즉 BISO, TRISO의 코오팅(coating)을 한 연료입자가 탄소 매트릭스 재료와 일체로 접착되어 약 12mm직경의 봉상으로 연료가 삽입된다.

연료입자는 내부에 낮은 밀도의 다공질 pyc로 코오팅된 층을 가지며 핵심의 팽창과 가스생성물을 체류시킨다.

표6 각형의 핵연료 특성비교

특성항목	P W R	PHWR	HTGR
연료형태	UO ₂	UO ₂	UC ₂ , ThO ₂
농축도, %	3.3	—	93
연료봉직경 mm	9.37	13	12
연료장진량, t	50	86	U:1.2., Th:25
연료봉최고 온도 °C	1,200	1,200	1,350
연료수명	3yr	323 day	4yr
연료교환주기	1/year	5/week	1/year
연료사이클	U235/U238/pu	once-through	U235/Th/U233
노심출력밀도 KW/l	107.9	47.5(최대)	8.4

6. 결 론

이상에서 핵 및 열공학적특성, 구조특성 및 연료특성을 개략적으로 관찰하였는데 각형마다 고유의 장단점이 있음을 알 수 있다.

경수로의 특징은 다른 어떤 형보다도 경험이 풍부하며 제작 기수도 압도적으로 많은 것이다. NSSS는 어떤 형보다도 구조가 단순하고 냉각 및 감속재인 경수는 어데서나 쉽게 구할 수 있다. 또한 최근의 수요증가에 따른 건설 기수의 급증은 높은 안전성을 요구하게 되어 이에따른 공학적 안전시설의 개발로 기술적으로 향상되어

가고 있다. 또한 Pu recycle의 수법으로 연료이용율이 향상되고 있다.

그러나 농축연료의 사용으로 농축시설이 없는 국가에서는 연료공급보장의 문제가 있기도 한다. 중수로는 중수를 냉각감속재로 사용하기 때문에 중성자경제가 좋아 천연우라늄연료를 사용할 수 있는 장점이 있어 농축시설이 없는 경우라도 비교적 간단한 공정에 의하여 연료를 공급할 수 있다.

그러나 고가의 중수를 고압에서 냉각재로서 사용하기 때문에 누설손실과 계의 운전압력이 낮은 이유로 발전소효율이 낮은 점을 무시할 수 없다. 그밖에 원자로구조의 복잡성, 트리튬발생등의 문제도 있다.

고온가스냉각로는 오랜 가스냉각로의 경험은 토대로 하여 발전되어 온것으로 역사와 경험은 있으나 그 기술적 배경은 상당히 있다고 할 수 있다. 그 특징은 냉각재의 출구온도가 높기 때문에 발전소열효율이 높고 또한 일반 산업공정의 열원으로 이용할 수 있는 것이다. 방출열원이 비교적 적기 때문에 냉각수가 없는 내륙지방에서도 건식 냉각탑에 의하여 동력을 얻을 수도 있다. 그리고 장차 가스고속로로서의 발전이 가능하다고 보고있다.

반면 토륨연료를 사용할 수 있다 하더라도 연료의 농축도가 높기 때문에 특정의 농축시설이 없으면 핵연료를 생산할 수 없을것이다. 그밖의 고온에 견디는 재료의 문제, 부식문제등 아직 해결하여야 할 많은 기술문제가 있다.

원자로시설도입에 있어서 노형을 선정하는 과정은 다만 원자로 자체의 기술적 우열만 가지고 논할 수는 없을 것이다.

원자로의 기술적 우열과 함께 신뢰성, 발전원가의 경제성, 장기적 핵연료사이클, 핵연료정책 국산화가능성등의 견지에서 검토되어야 할것이다. 그러나 더욱 중요한 것은 원자로도입에 선행되어야 하는 건설, 운전 및 보수유지의 기술적 능력의 배양이라 할 수 있을 것이다.

<完>