

고리 원자력 발전소 개요 (古里 原子力 發電所 概要)

정 보 헌

한국전력 원자력실
(1969. 7. 1 접수)

서 론

최근 세계 각국에서 상용 원자력발전소가 활발히 건설되고 또한 운전되고 있다.

우리나라도 급상승이 예상되는 전력수요에 대하여 가용에너지 자원의 상대적 결핍을 감안할때 장차 전원개발에 있어서는 원자력발전의 도입이 불가피하다는 것을 오래전부터 인식하여 왔다.

따라서 1962년 부터 원자력청과 한전 공동으로 원자력발전관계 자료 및 정보를 수집하고 원자력기술 및 경제면에서 예의 검토 분석하여 한전 전력계통에의 투입가능성을 계속 추구하여 왔다.

이에 기술성 및 안전성이 입증된 500MW 규모의 원자력발전소를 도입 건설할 경우 동일 규모의 재래식 화력발전소와 충분한 경합성이 있다는 결론하여 1967년 9월에 수립한 "10개년 전원개발 계획"에 원자력발전소 제1호기와 제2호기를 각각 1974년 및 1976년에 준공하도록 계획하였다.

발전소 건설 추진경위

1962년 이래 원자력발전소 건설 추진경위는 대략 다음과 같다.

1962년 원자력발전 대책위원회를 구성하여 원자력발전 전망의 분석 및 평가

1963년 10월 IAEA 원자력발전 예비조사단이 내한(제1차)하여 원자력도입을 위한 예비조사 시행

1965년 6월 IAEA 부지조사단이 내한(제2차)하여 원자력청 및 한전과 공동으로 3개의 유망 후보지점에 대한 기초 조사시행

1966년 12월 한국전력에 원자력과 신설

1967년 원자력발전 조사위원회를 구성하여 타당성 예비조사 시행

1967년 8월 IAEA 부지조사단이 내한(제3차) 유망지점에 대한 세부조사시행

1967년 9월 10개년 전원개발계획에 원자력 발전소건설계획을 삼입

제1호기 500MWe 1974년 준공 목표

제2호기 500MWe 1976년 준공 목표

1968년 2월 대통령령 제호3371에 의거 원자력발전 추진위원회를 구성하여 계획수립과 추진에 관한 사항을 심의

1968년 4월 9일 제3차 원자력발전 추진 위원회를 개최하여 한전을 원자력발전 실수요자로 결정하고 각 관계기관의 업무분장을 확정

1968년 5월 1일 한전 원자력실 발족하여 3개과로 확장

1968년 6월 9일 제1유망 후보지인 경남 동래군 장안면 지점의 지질조사 및 세부측량실시

1968년 6월 24일 예비견적서 제출안내서를 4개사에 발급

미국 : General Electric Co.(GE)

Combustion Engineering Inc.(CE)

Westinghouse Electric International

Co.(WEICO)

영국 : The British Nuclear Export Executive (BNX)

1968년 10월 25일 4개사로부터 견적서 접수

1968년 6월 1일~10월 31일 미국 Burns & Roe 회사로 하여금 원자력발전소 건설 타당성조사를 시행토록 의뢰하여, 그 타당성이 재차 입증됨

1969년 1월 31일 원자력발전소 건설지점으로 경

남 동래군 장안면 고리를 선정 동일(同日) 계약대상자로 미국의 Westinghouse사를 선정.

원자력발전소란 단적으로 말하여 재래식 화력발전소의 기관에 상당하는 부분을 원자로 및 증기발생기로 대체하고 운탄, 저탄, 미분탄장치 및 회터리 장치를 핵연료 취급장치 혹은 핵연료 냉각용 설비등으로 바꾼것이다.

이번에 도입될 원자력발전소는 우리나라 최대 규모인 공칭출력 60만kw 용량의 발전소로 총전출력 564,000kw가 될것이다. 터빈은 재열재생식 Tandem Compound 형이며 복수기의 냉각수로는 해수를 이용하게 된다. 특기할 것은 고리 원자력발전소 건설에 따라 345kv 초고압 송전선을 신설, 울산 변전소를 통하여 서울지구로 연결되고 발전소 기동용 전원은 울산변전소로부터 154kv 수전선으로 공급 받게 된다는 것이다.

원자로는 Westinghouse Type 인 가압경수로(Pressurized Water Reactor, PWR)로써 열출력 1785MWt, 운전압력 2250psia이며 냉각회로는 2회로를 채택하고 있다.

여기서 Westinghouse 가 공급하게 될 PWR을 비롯한 Nuclear Island의 각종 설비를 수회로 나누어 약속하고자 한다. 제 1회는 Nuclear Steam Supply System 중 원자로에 관하여 수록한다. 여기에 기재된 각 Parameter의 값은 현재 기술사양서를 협의하고 있는 중임으로 최종 계약확정에 따라 다소 변경될 수도 있음을 부기하고자 한다.

원자로(Reactor)

1. 개 요

원자로는 노심(Core), 감속 냉각재(Moderator-Coolant), 열차폐(Thermal Shield), 제어봉 Cluster, 제어봉 Cluster 구동장치 및 이들을 받치는 구조물 등으로 구성된다.

노심은 대략 원주형으로 생겼으며 내부에는 핵분열물질로 된 연료집합체(Fuel Assembly)가 들어 있다. 연료 집합체는 저농축 UO₂ Pellet를 Zircaloy-4 피복관에 밀봉한 연료봉(Fuel Rod)을 여러개 정방형으로 배열 집합시킨 것이다. 가압된 경수는 노심의 열차폐와 원자로 용기(Reactor Vessel) 사이를 통하여 아래로 흘러내려 다시 노심을 통하여 상부로 흐르게 되는데, 이 경수는 원자로의 감속재 및 냉각

재로 사용 될뿐 아니라 붕산(Boric acid)의 용매로도 사용된다.

원자로의 제어는 중성자 흡수용 제어봉 Cluster를 삽입하는 방법과 원자로 냉각재에 중성자 흡수용액(붕산)을 주입하는 방법을 병용한다. 제어봉 Cluster는 발전소 출력의 큰 변동에 따른 원자로 출력을 조정하고 원자로 냉각재 온도변동에 따른 노심의 반응도를 조정한다. 동시에 제어봉은 원자로의 Trip 시에는 중력에 의하여 순식간에 아래로 떨어져 순간적인 발전소 출력 차단에 속응(速應) 할 수 있도록 설계되어 있다. 냉각재에 용해되어 있는 붕산의 농도를 조정하는 제어방법은 연료의 연소에 따른 반응도 감소, Xenon 과 같은 방사성 생성물에 따른 반응도의 변화를 보상하기 위하여 사용된다.

원자로의 노심은 보통 다영역(Multi-Region)으로 되어있는데, 고리 발전소의 노심은 3영역으로 되어 있다. 연료교체시에는 중앙영역의 연료를 제거하고 중간영역의 연료를 중앙으로 이동시키며 새로운 연료를 노심의 제일 외각 영역에 삽입 하게된다. 원자로에 대한 각종 Parameter는 제1표와 같다.

제1표 REACTOR CORE PARAMETERS
TWO LOOP NSSS

Total Heat Output, Megawatts	1780
Btu Per Hour	6073.6×10 ⁶
Heat Generated in Fuel, Percent	97.4
System Pressure, psia	
Nominal	2250
Coolant Conditions:	
Total Flow Rate, Lbs per hour	67.3×10 ⁶
Coolant Temperature, (°F)	
Nominal Inlet	546.0
Average Rise in Vessel	67.2
Outlet from Vessel	613.2
Heat Transfer	
"Active" Heat Transfer Surface Area, ft ²	28,714
Average Heat Flux, Btu/hr ft ²	206,000
Maximum Heat Flux, Btu/hr ft ²	580,600
Maximum Thermal Output, KW/ft	18.8
Fuel Rod(Cold Dimensions)	
Outside Diameter, in.	0.422
Clad Thickness, in.	0.0243
Diametral Gap, in.	0.0065

Pellet Diameter, in.	0.3669
Pitch, in.	0.556
Rod Array in Assembly	14×14
Rods Per Assemblies	179
Total Number Fuel Rods in Core	21,659

각재에 의하여 침식되지 않고 외형이 변형되는일도 없다. 더욱이 Fuel Pellet 인 UO_2 는 그 원자의 격자(Lattice)가 견고하게 결합하고 있으므로 Fuel Pellet 의 피복에 우발적인 균열이 생기더라도 피복재의 심한 손상은 거의 없다.

General Core Data

Equivalent Core Diameter, ft.	8.1
Core Length, Between Fuel Ends, ft.	12.0
Fuel Weight, Uranium, Kilograms	48,000
Number of Fuel Assemblies	121

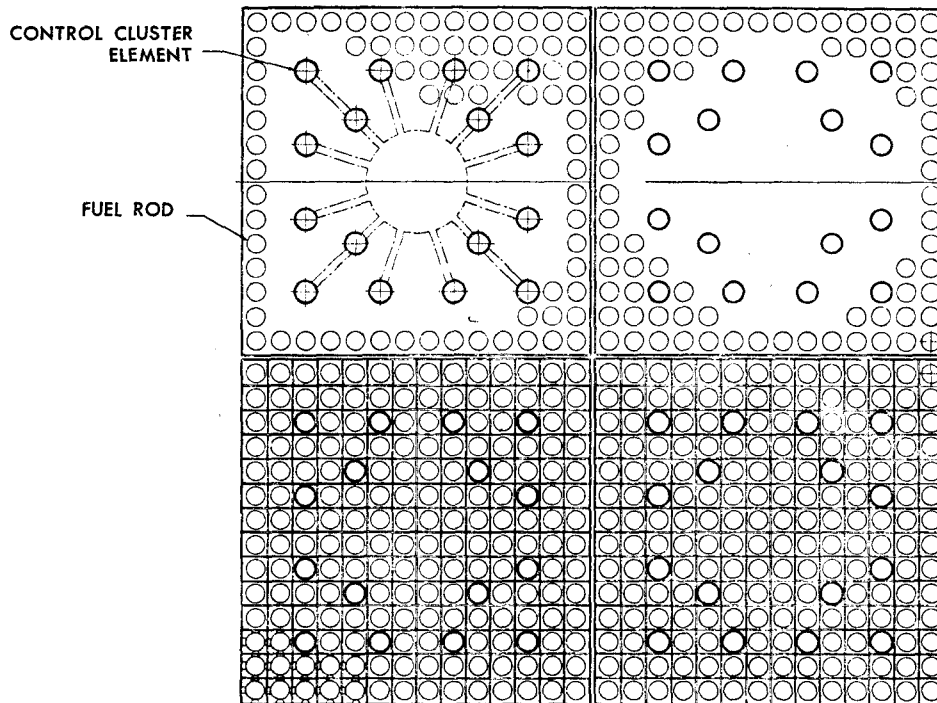
2. Fuel Pellets

원자로 노심의 가장 기본적인 요소는 원주형 Fuel Pellet 이다. 이 Fuel Pellet 는 저농축된 UO_2 분말을 Sintering 과정을 통하여 Pellet 형 연료 요소로 만든 것이다. 이 연료요소는 다시 원자로의 온도 및 압력 조건하에서도 화학적으로 안전하도록 피복 밀봉한다. UO_2 는 고온수에서 침식되지 않는 특성이 있으므로 Fuel Pellet 의 피복이 손상되더라도 원자로 냉

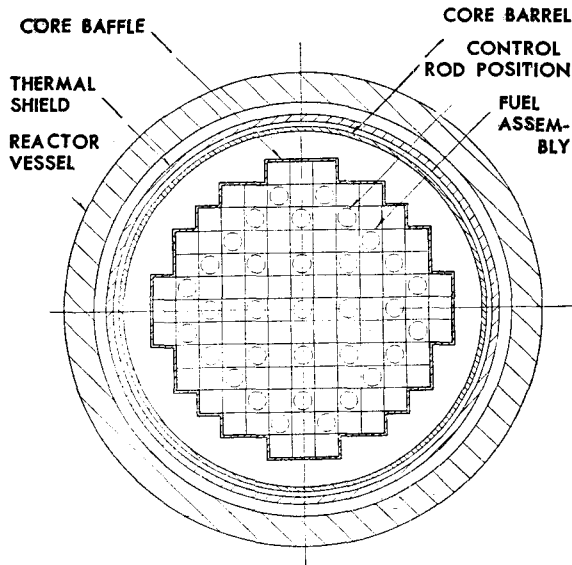
3. 연료봉(Fuel Rod)

UO_2 Pellet 여러개를 Zircaloy Tube 에 넣어 밀봉하여 Fuel Rod 를 만든다.

연료봉 피복은 원자로 운전중 온도 및 압력 등 어떠한 조건에서도 견딜 수 있도록 설계되어 있다. 연료봉의 내부에는 Plenum 이란 공간이 있어서 핵분열로 인하여 발생하는 개스가 이곳에 모이게 되어 있다. 이 Plenum Space 의 크기는 연료 Pellet 에서 발생하는 핵분열개스에 의한 압력을 고려하여 이에 충분히 견딜 수 있도록 설계되어 있다. 원자로 출력이 최대로 되고 Fuel Pellet 의 온도도 최고도에 달하면 Fuel Pellet 는 열팽창에 의하여 연료봉 피복과 접촉되고 따라서 연료봉에서 발생하는 열에너지는 용



제 1 도 Fuel assembly & Control Cluster Cross Section (14×14Assembly)



제 2도 Core Cross Section

이하계 원자로 냉각재에 전달된다.

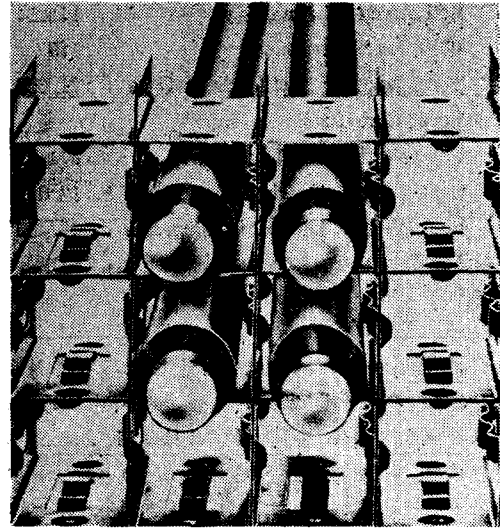
4. 연료 집합체(Fuel Assembly)

연료집합체는 연료봉을 정방형으로 배열 집합시켜 놓은 연료집단을 말한다. 이 연료집합체의 연료봉 사이 여러 곳에는 제어봉의 Guide Thimble이 있어서 제어봉이 연료봉 사이에 삽입 될 때 제어봉을 인도한다. 연료집합체의 단면도는 제 1도, 노심단면도는 제 2도에 표시되어 있다.

연료집합체는 소위 Canless 형으로 되어 있어 원자로 냉각재가 직접 연료봉에 접촉하여 열에너지의 전달이 효과적으로 이루어진다. 연료집합체는 노심에 있는 수개의 가벼운 스프링 고정형 Grid로 지지되며 제어봉 Guide Thimble 및 노심내부 측정용 계기의 Thimble 도 같은 Grid로 고정된다. 스프링 고정형 Grid는 대단히 가벼운 물질로 되어 있으므로 이 Grid에 지엽적으로 흡수되는 중성자는 거의 없다. Grid는 노심내의 높은 출력밀도 때문에 연료봉을 정확한 위치에 견고하게 고정시켜야 하며 Grid는 이런 점을 충분히 고려하여 설계되어 있다.

스프링 고정형 Grid는 제 3도에 표시된바와 같이 정사각형의 격자내에 스프링이 있어 격자내에 위치하는 연료봉을 스프링힘으로 고정시켜 주도록 만들어져 있다. 각 연료봉은 정사각형 격자내에서 6개의 지점에서 고정된다. 따라서 이 스프링 고정형 Grid에 의하여 연료봉의 진동이나 회전이 방지되며 또한 원자로내의 고열에 의하여 연료봉이 팽창하더라도

연료봉 자체가 활(弓)처럼 휘어지는 일이 없이 측방향으로만 팽창하게 된다.



제 3도 Spring Clip

스프링 고정형 Grid는 제어봉 Cluster의 Guide Thimble에 고정 설치하여 연료집합체의 골격을 이루며 연료봉은 Grid로 삽입된다. 연료가 일단 장전 되면 연료집합체는 Grid와의 접촉점이 수 없이 많으므로 완전한 골격으로 고정된다. 연료집합체 상부에는 조작용 Fitting이 설치되어 있다. 연료집합체의 조립된 모양은 제4도와 같다.

노심을 원자로내에 장전할 때 냉각재의 by-pass를 방지하기 위하여 Guide Thimble plug를 연료집합체내에 삽입한다.

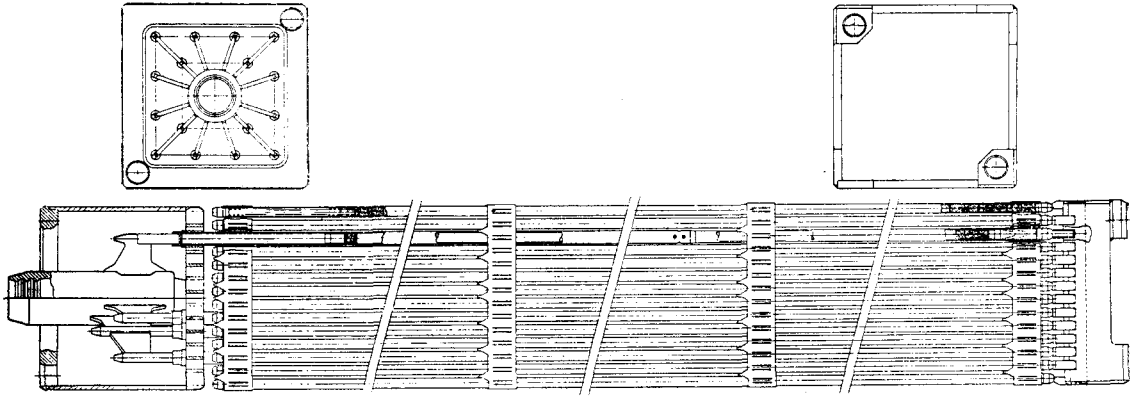
각 연료집합체의 이 Guide Thimble 중의 한개는 측정용 계기를 위하여 끼우로 삽입한다.

5. 제어봉 Cluster

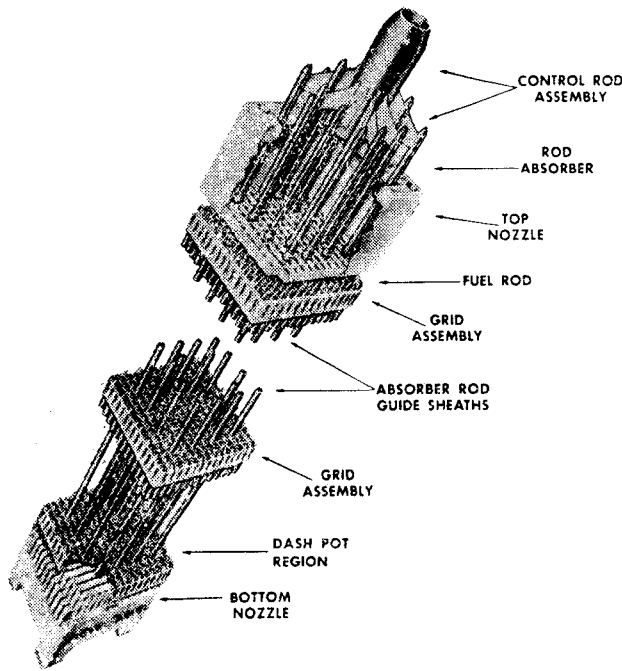
제어봉 Cluster는 상부에 Spider 모양의 Bracket가 있는 원주형 제어봉의 집합체로 구성된다. Cluster Assembly는 제5도와 같다.

원자로에는 두가지형의 제어봉 Cluster를 사용하는데 하나는 Full Length Cluster이고 다른 하나는 Part Length Cluster이다. Full Length Control Rod Cluster는 중성자 흡수재(Boron Carbide 혹은 다른 중성자 흡수재)를 Stainless Steel Tube에 가득 밀봉하여 제작된 것으로 적당한 안전도의 여유를 가지고 노심의 반응도를 조정한다.

Part Length Control Rod Cluster는 외관은 Full Length와 같으나 제어봉의 하부 1/4만 중성자 흡수



제 4 도 Typical Fuel assembly Outline



제5도 Control Rod Cluster Assembly

재를 채우고 나머지 부분에는 산화알루미늄을 채워서 제작한다. 이 Part Length Control Rod는 제어봉 축방향의 출력분포와 출력변동에 따른 축방향의 Xenon 분포를 조정하게 된다.

Full Length Control Rod Cluster와 Part Length Control Rod Cluster의 수량과 위치 배열은 원자로 노심의 반응도와 출력분포를 조정하기 위한 조건에 의하여 설계시에 결정된다.

각 제어봉 Cluster는 원자로 상부에 있는 전자(電磁) 구동식 구동장치에 의하여 독립적으로 조정되는

데 노심의 반응도는 Cluster를 상부로 인출할 때 증가하고 하부로 삽입할 때 감소된다. Guide Thimble은 연료집합체내에 대칭적으로 배치되며 그 기능은 주로

- (1) 제어봉의 상하 운동 안내
- (2) 제어봉의 고착방지
- (3) 원자로가 Trip 될 때 Dashpot 역할을

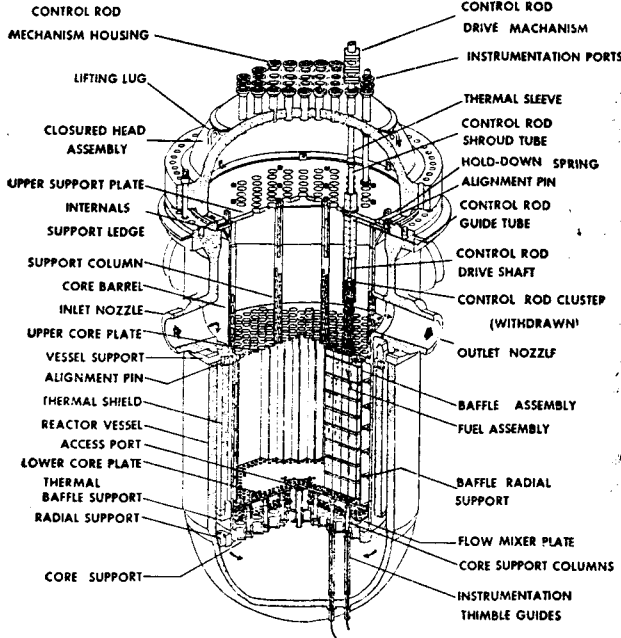
을 하여 제어봉이 아래로 떨어질때 노심에 주는 충격을 완화시켜 준다. 제어봉을 완전히 상부로 뽑아낸 상태에서 제어봉의 끝부분은 이 Guide Thimble에서 완전히 빠지지 않는다. 따라서 제어봉 삽입시에 제어봉은 이 Guide Thimble을 통하여 노심내로 신속한 삽입이 가능하다. Guide Thimble의 밑부분은 막혀 있기 때문에 제어봉의 삽입시 Guide Thimble 하부에 도달하면 하부낙하운동을 억제하여 충격을 방지해 준다.

6. Core Arrangement Support

a. 개요

원자로 내부에서 노심을 지지하는 가장 중요한 지지물은 제6도에 표시된 바와 같이 두부분으로 나누어져 있다. 즉 노심 상부지지 구조물(Upper Core Support structure)과 Core Barrel Assembly로 되어 있다. 노심 상부지지 구조물은 제어봉Guide Tube, Guide Tube 지지판 및 노심 상부지지판으로 이루어진다. 노심 상부지지 구조물의 주요한 역할은

- (1) 연료집합체의 상부를 고정시킨다.
- (2) 제어봉 Cluster가 원자로 냉각재의 유향(流向)으로 받는 힘때문에 위로 밀리는 것은 방지한다.
- (3) 제어봉 Cluster와 Drive Shaft를 안내한다.



제6도 Reactor Vessel & Internal

노심 Barrel Assembly의 주요부분은 노심 하부판을 지지하는 기둥, 노심 지지판, 노심 Barrel, 노심 Baffle 및 상부지지 Barrel로 이루어진다. 노심 Barrel Assembly의 역할은

- (1) 노심의 무게를 원자로 용기의 Flange에 전달 지지토록 한다.
- (2) 연료집합체의 밑부분을 고정시킨다.
- (3) 제어봉 Cluster가 Trip하여 하강할 때 그 힘을 받아 원자로 용기의 Flange에 전달한다.
- (4) 원자로 냉각재가 원자로 용기와 노심을 통하여 고르게 흐르도록 한다.
- (5) 원자로 용기벽에 방사선의 조사(照射)를 감소시킨다.
- (6) 열차폐(Thermal Shield)를 지지한다.

원자로 용기 내용물들의 크기는 고온 고압인 냉각재의 흐름으로 인하여 받는 응력(Stress)보다는 오히려 내용물의 허용진동 한계에 따라 지배된다. 실제적으로 응력은 그리 큰것이 아니며 정상 운전시에 응력에 의한 원자로 내용물의 사고는 거의 없다.

실제로는 운전상에 있어서, 정상 또는 비정상 상태에서 일어날 수 있는 모든 변화에 대하여 충분히 고려되어 설계되므로 노심 지지물의 구조나 배치는 충분히 안전성이 있고 신뢰성이 있으며 연료교체시에도 편리하도록 되어있다. 실제 운전시 주요한 구

조물이 약간의 응력을 받게 되나 실제로 사고가 발생하는 경우는 거의 없으며 비록 어떤 구조물에 작은 사고가 발생 하더라도 이 사고가 다른 구조물에 파급될 염려는 없다.

b. 원자로 내용물의 재질 및 제작

원자로 구조물의 제작과정에 있어서 조립시에 차질이 없도록 각구조물의 규격을 면밀하게 검사하며 필요에 따라 용접부분은 가공을 하여 정확한 규격품을 만들게 된다.

Core Barrel은 Austenitic Stainless Steel로 제작하여 용접하게 되는데 엄밀한 용접명세에 의하여 용접될뿐 아니라 용접부분은 비파괴검사(Radiography Test)와 Dye Penetrant Test에 의하여 엄밀하게 검사된다. 용접 순서도 Core Barrel이 만곡(灣曲)되거나 잔류 응력을 받지 않도록 선택하여 용접한다.

노심 하부지지판(Lower Support plate)은 Austenitic Stainless Steel Casting을 선반으로 가공하여 제작하고 노심 하부판(Lower Core plate)은 Stainless Steel 판을 선반으로 가공하여 만든다. 노심 지지주(Support Column)는 Austenitic Stainless Steel Bar를 선반으로 깎아 제작한다.

노심상부지지판(Upper Support plate)은 Austenitic Stainless Steel Casting이나 Steel Plate를 선반으로 가공하여 제작하고 노심상부판(Upper Core Plate)은 Stainless Steel Plate를 깎아서 만든다. 이들 판은 초단파를 사용하여 내부의 힘이나 균열을 검사하고 표면의 균열은 Dye Penetrant 시험으로 검사한다.

Guide Tube Assembly도 Austenitic Stainless Steel Plate를 선반가공하여 제작하여 용접한다. 이 용접 부분도 Dye Check를 하여 결함이나 균열을 검사하게 된다. 그리고 이 Guide Tube Assembly는 제어봉 Cluster와 정확히 맞는가 규격시험을 하여 합격하여야 된다.

원자로 구조물의 중요한 용접부분은 깊숙히 용접이 잘 되도록 한다. 상하 Core Barrel은 Furnace Stress Relieving 과정을 통하여 제작되며 구조물의 중요한 용접부분도 국부적인 Stress Relieving을 하게 된다.

c. 노심 구조물에 걸리는 Load

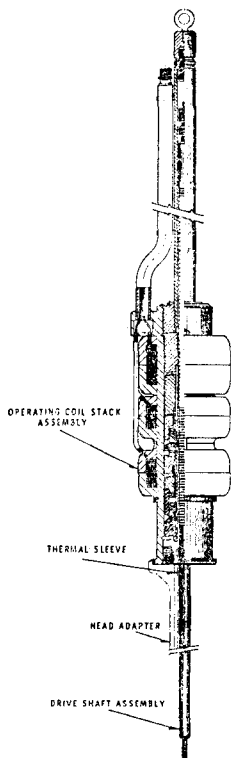
노심 구조물에 걸리는 Load는 원자로 내용물의 정적(靜的) 및 동적(動的) Load(지진포함), 냉각재

의 자중, 냉각재 유동에 따른 Load, 냉각재 온도 변화와 열팽창에 따른 Stress 등을 생각할 수 있으나 노심 구조물들은 이에 충분히 견딜 수 있도록 설계 제작되며 발전소 수명 기간동안 노심구조물의 열화는 무시할 정도다.

d. 부식과 방사선 조사(照射)

노심 구조물의 재질은 원자로 냉각재에서도 충분히 내부식성이 있는 물질을 택하게 되는데 보통 304 Stainless Steel 이나 혹은 더욱 내부식성이 좋은 재질을 사용하게 된다. 이 재질은 다년간 원자로 구조물의 재질로 사용하여 세계적으로 인정을 받고 있는 재질이다.

봉산이 용해되어 있는 냉각재내에서의 내부식성시험은 실험실에서 뿐만아니라 실제로 발전용 원자로에서 계속 시험하여 재질의 내부식성은 충분히 입증되고 있다. 원자로내의 중요한 구조물에 대하여는 충분한 방사선 조사(照射)시험을 행하여 Gamma 선에 의한 온도 상승율을 결정하고 유체역학적 분석으로 연료봉의 Film Cooling Coefficient 를 결정한다. 그리고 방사선 조사에 의한 온도분포와 열응력을 감안하여 내부 구조물이 이에 충분히 견디도록 설계하게 된다.



제7도 Control Rod Drive Mechanism

7. 제어봉 구동장치 (Control Rod Drives)

a. 개요

제어봉 Cluster 는 원자로 용기 상부에 있는 Magnetic Jack Drive 형의 구동장치로 구동된다. 이 구동장치는 제 7도와 같은 모양을 가지고 있으며 견고하고 신뢰성이 있어서 고압 고온의 경수로에 사용된다. 이 구동장치는 미국의 Yankee Rowe Plant, 이태리 Trino 에 있는 SELNI Plant 에서 사용하는 것과 같은 형으로 상기 두 발전소에서 이 구동장치의 성능이 성공적이라는 것이 입증되었다.

구동장치는 다음 5개의 중요부분으로 구성된다.

(1) Pressure Housing

- (2) Operating Coil Stack
- (3) Internal Latch Assembly
- (4) Position Indicator Coil Stack
- (5) Control Rod Cluster Drive Shaft

b. Pressure Housing

Pressure Housing 은 Head Adapter 상부에 있는 Stainless Steel 로만들어진 Housing 으로 제어봉 구동 장치의 모든 움직이는 부분은 이 Pressure Housing 내에 들어 있다. Head Adapter 는 원자로 용기상부에 용접하여 놓으므로 실제적으로는 원자로 용기의 한 부분을 이루게 된다. 이 Pressure Housing 은 완전히 밀봉되어 있어서 기계적으로나 전기적으로 혹은 유체적으로도 완전히 다른 원자로 구조물과 격리된다.

c. Operating Coil Stack

Operating Coil Stack 은 Pressure Housing 외부에 설치한 3개의 독립된 Coil 로 이루어진다. 이 Coil 은 아무 기계적인 고정장치 없이 Pressure Housing 의 모서리에 얹혀지며 필요에 따라 원자로의 가압상태에서 제거하거나 교체할 수 있게 되어 있다. Coil Stack 에는 전선을 연결할 수 있는 장치가 되어있고 Coil 을 식히기 위하여 공기냉각장치가 설치되어 있다.

d. Internal Latch Assembly

구동장치의 Internal Latch Assembly 는 Pressure Housing 내부에 있는것으로 Gripper Latch 와 Armature 로 이루어진다. Gripper Latch 는 Drive Shaft 를 둘러싸고 있는 가동(可動) Armature 에 의하여 구동되며 홈이 파인 Drive Shaft 는 이 Gripper Latch 에 의하여 구동된다. 이 Armature 는 Solid State System 에 의하여 결정되는 순서와 시간에 따라 External Operating Coil 에 의하여 구동된다. Latch Assembly 는 Arm 이 Drive Shaft 를 꼭 잡거나 떠질때 항상 기계적으로 마찰없이 Drive Shaft 가 움직일 수 있도록 설계하여 Latch 나 Drive Shaft 의 홈이 마모되지 않도록 하고 있다.

대부분의 발전소 운전시간동안 제어봉 구동장치는 노심에서 인양된 제어봉 Cluster 를 그대로 그 위치에서 잡고 있게 되는데 이런 상태에서 한개의 Coil 만 Energize 되어 해당 제어봉 Cluster 의 위치를 유지하게 된다. 만일 이 Coil 에 원자로 Trip 이나 불의의 정전사고로 전원이 차단되면 제어봉 Cluster 는 중력에 의하여 노심 하부로 떨어진다.

Pressure Housing 은 운전시 원자로 냉각재 속에 들어가게 되므로 이 Housing 내부의 장치는 2500psig 의 고압에 견디도록 설계되어 있다.

e. Position Indicator Coil Stack

Position Indicator Coil Stack 은 구동장치에 설치되어 있는 소형의 원주형 차동 변압기로 이 변압기의 2차측 출력이 Drive Shaft 의 위치에 따라 변하므로 제어봉의 위치를 표시하게 된다.

f. Drive Shaft

Drive Shaft 에는 들레에 홈이 파여져있어 구동장치의 Latch 와 연결된다. Drive Shaft 의 일부부분에는 제어봉 Cluster 와 연결하기 위한 Coupling 이 있어 원방조정으로써 이 Coupling 이 제어봉 Cluster 와 연결 혹은 분리되도록 설계되어 있다. Drive Shaft Mechanism 은 원자로 용기 외부와 완전히 밀봉하기 때문에 주유(注油)할 필요가 없고 부식물에 의한 냉각재 오염의 염려가 없다.

8. 노심의 Thermal-Hydraulic Design

노심의 Thermal-Hydraulic Design 의 주요 목적은 원자로가 최악의 운전조건에 달하더라도 노심에서 발생하는 열에너지를 냉각재에 충분히 전달하여 노심의 어떤 점에서라도 연료피복온도가 규정치 이상 상승하지 않도록 하기 위한 것이다.

노심설계의 중요한 기준이 되는 것은 연료의 DNB (Departure from Nucleate Boiling)와 안전율이다. 원자로 운전중 DNB 는 일어나지 않아야 되는데, 만일 DNB 가 일어나면 열전달장치가 변형되므로 연료피복재의 온도가 규정치 이상으로 상승하게 된다.

DNB Heat Flux Ratio 로써 DNB Safety Margin 을 측정한다. DNB Heat Flux Ratio 는 특정한 설계 조건하에서 일어나는 열유속(Heat Flux)을 실제 열유속으로 나눈값으로 표시된다. DNB 는 수리학(水力學)과 열전달의 혼합된 현상으로 일어나며 노심내에서 유체가 흐르는 상태와 열유속이 분포된 상태에 따라 영향을 받는다. 원자로 설계에 있어서 중요한 것은 DNB 가 일어나는 열유속의 치(值)와 DNB 가 일어나는 위치인데, DNB 가 일어나는 위치에 따라서 국부적인 DNB 열유속의 크기와 DNB 가 일어난 부분의 연료봉 온도를 결정할 수 있다. 국부적인 DNB Heat Flux Ratio 는 DNB 가 일어나지 않는 범위내에서의 허용 열유속을 결정하는 지침이 된다.

실제적으로 냉각재 Enthalpy 의 증가와 노심의 Hottest Channel 의 열유속은 불균일하므로 출력분

포 역시 불균일하게 된다. 이 불균일성을 정량적(定量的)으로 Hot Channel Factor 라 규정하는데 이는 Parameter 의 최대치의 비율로 표시된다. 즉 Enthalpy 증가에 관한 Hot Channel Factor 는 Hottest Channel 의 Enthalpy 증가와 average Channel 의 Enthalpy 증가의 비율로 정의되고, 열유속에 대한 Hot Channel Factor 는 노심의 가장 높은점의 열유속과 노심평균열유속의 비율로 정의한다.

Hot Channel Factor 는 Nuclear Sub-factor 와 Engineering Sub-factor 의 적(積)으로 계산된다. 열유속 Hot Channel Factor 에 있어서 Engineering Sub-factor 는 연료의 농축, Fuel Pellet 의 직경과 밀도 등 제작상의 Tolerance 에 따라 결정된다. Enthalpy 증가에 따른 Hot Channel Factor 에 있어서의 Engineering Sub-factor 는 노심에의 냉각재 유입분포, 노심의 배열 및 연료집합체, 제작상의 Tolerance 등으로 결정된다. 이들 Sub-factor 은 서로 연관관계가 있으므로 같이 계산되어야 한다. Hot Channel Factor 의 Nuclear Sub-factor 는 노심의 축방향 및 반경방향 전체에 걸친 출력분포를 감안하여 결정하게 된다.

DNB Ratio 는 Hot Channel Factor 의 Enthalpy 증가와 열유속 그리고 DNB 열유속을 사용하여 결정하게 된다. 이 DNB Ratio 는 원자로가 최대과부하 출력에서 1보다 큰치로 나타나는데 이것은 원자로 출력 변동시 충분한 Safety Margin 이 있다는 것을 표시한다.

원자로 노심의 Thermal-Hydraulic Design 에 있어서 또 다른 중요한 사항은 연료봉의 Linear Heat Rate(kw/ft)이다. 이 Heat Rate 는 Fuel Pellet 의 온도상태를 결정하는 것으로 계산에 의하면 Westinghouse 연료봉은 이 Heat Rate 가 22kw/ft 까지 달해도 UO₂ 연료가 녹지않는다고 한다. 실제적으로 최대 Heat Rate 는 상기치(值) 보다 적으므로 원자로 최대과부하 상태에서라도 충분한 Safety Margin 이 보장된다.

9. Burnable Poison Control

연료를 초기장전할때 연료의 반응도를 조정할 목적으로 Burnable Poison 도 같이 사용하는데 이는 연료집합체속에 삽입되어 Chemical Shim, 제어봉과 함께 초기장전한 연료의 과도한 반응도를 억제하게 된다.

Burnable Poison 은 Borated Pyrex Glass 봉을 Stainless Steel 로 피복하여 제작된 것이다. 이 봉은

노심 사이에 비어있는 제어봉 Guide Thimble 에 삽입하여 놓는다. 이 봉의 Poison 은 원자로를 운전함에 따라 감소하게 된다. 이 Poison 감소율은 아주 늦으므로 첫 Fuel Cycle 전 기간동안 원자로의 냉각재의 붕산농도와 감속재의 온도계수는 이들 본래의 치(値)보다 낮게 유지된다.

연료의 첫번 Cycle 이 지난후에는 일부 연료의 반응도가 감소하므로 다음 Fuel Cycle 부터는 Burnable Poison 을 사용할 필요가 없다.

10. 기동용중성자원(Startup Neutron Source)

중성자 Source 는 1차 및 2차 Source 두 가지로 구분된다. 1차 Source 는 원자로의 제일 첫번 기동시와 첫 Fuel Cycle 기간동안의 초기 기동시에 사용되는 중성자 Source 를 말하고, 2차 Source 는 정상적인 원자로 기동시에 사용하는 중성자 Source 를 말한다. 1차 Source 로는 Polonium 및 Beryllium 의 혼합물이나 Thorium 228 및 Beryllium 의 혼합물을 사용하며 2차 Source 로는 Antimony 와 Beryllium

혼합물을 사용한다. 이 중성자 Source 의 구조는 연료봉과 비슷하다. 1차 Source 는 봉입형 Capsule 의 활동성(Active) Source Material 를 Can 에 봉입하여 제작한다. Capsule 의 크기는 필요한 중성자 발생율에 따라 결정된다. 이 Capsule 은 피복 Can 의 특정한 위치에 삽입하고 나머지 부분은 Aluminum Oxide 를 채워서 Can 양끝을 밀봉한다.

2차 Source 도 같은 방법으로 제작되나 단지 Source Material 이 활동성이 아니고 봉 혹은 Pellet 형이라는 점이 다르다. 2차 Source 의 길이는 연료봉의 길이와 같다.

상기 2종의 중성자 Source 는 사용하지 않는 제어봉 Guide Thimble 에 삽입하여 기계적으로 고정시킨다. 중성자 Source 에 의하여 발생하는 열에너지를 고려하여 Source 가 삽입된 Thimble 에 원자로 냉각재가 통하도록 해야함은 물론이다.

중성자 Source 에서 항상 적당한량의 중성자속이 발생하도록 노심 최종설계시에 Source 의 수량, 형(Type) 및 위치를 결정한다. (계속)