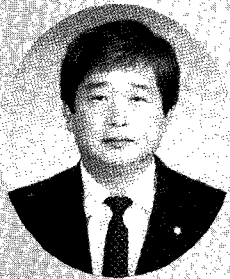


특 집

多目的研究用原子爐

3

設計概念 및 特性



이 지 복

한국원자력연구소 연구로기술부장

우리 나라도 연구용원자로를 운영한 지는 이미 30년이 넘었다. 최초의 연구로인 TRIGA Mark-II가 1962년, 두번째인 TRIGA Mark-III가 1972년 한국원자력연구소에 건설되어 연구, 방사성동위원소 생산, 원자력 인력 양성에 기여한 바 크다. 그러나 이들 원자로는 중성자속이 낮아 이용에 한계가 있으므로 연구로 이용자들은 새로운 연구로의 출현을 고대하여 왔다.

특히 80년대 이후 이룩한 원자력발전소의 국산화는 원전연료 및 부품의 조사시험을 위하여 높은 중성자속의 연구로 운영을 불

가피하게 하였다. 이외에도 계속 증가하는 방사성 동위원소의 수요, 높은 수준의 연구결과를 필요로 하는 물리, 재료과학분야 등에서 높은 중성자속을 가진 연구로의 출현을 고대하여 왔다. 이러한 요구에 부응하여 한국원자력연구소에서는 열출력 30MW의 다목적연구로를 1985년 설계에 착수, 1994년 완공을 눈앞에 두고 있다.

활용계획과 설계요건

연구용원자로가 발전용원자로와는 달리 종류가 많고 열출력도 영출력에서부터 수백MW까지 다

양한 것은 그 활용목적에 따라 설계되고 건설되기 때문이다. 따라서 연구로 설계의 첫 단계는 활용계획의 확립이다. 이에 따라 다목적연구로의 활용계획과 설계 개념은 사업 첫 해인 1985년에 이루어졌다. 다목적연구로의 확정된 활용계획은 다음과 같다.

① 발전용 원자로(PWR 과 CANDU)의 핵연료와 부품 국산화에 따른 노내 성능시험

② ^{99}Tc , ^{131}I , ^{192}Ir , ^{60}Co 등 급증하는 방사성 동위원소의 생산 및 고품질의 실리콘 반도체 생산 공급

③ 산업과 연구개발에 필요한 시료의 중성자 방사화분석 및 핵물리, 고체물리, 재료금속 분야의 중성자 빔(Beam)을 이용한 기초 및 응용연구

④ 원전연료를 비롯한 재료 및 부품의 비파괴 검사를 위한 중성자 래디오그래피(Radiography)

이와 같은 활용계획을 만족하고 안전성과 경제성을 고려한 다목적연구로의 설계요건은 다음과 같이 결정되었다.

① 노심 중앙 조사공에서 최대 열중성자속은 $5 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 이상이어야 한다.

② 원전연료 교체주기 동안 중성자속의 변화는 20% 이하이어야 한다.

③ 원전연료 교체주기는 4주 이상이어야 하고, 활용을 위한 초과방응도는 25mk 이상이어야 한다.

④ 폐기 원전연료의 연소도는 초기 핵분열물질의 50% 이상이어야 한다.

⑤ 활용계획을 만족시키는 다양한 크기, 형태 및 방향을 갖는 실험시설은 갖추어야 한다.

⑥ 원자로는 고유의 안전특성을 확보해야 한다.

설계개념

다목적연구로는 세계 여러 나라에서 운전중이거나 건설중인 연구로를 비교 검토하여 설계개념을 확립하였다. [표 1]은 다목적연구로의 주요 특성이다.

원자력발전소에서는 핵연료 교체시에만 노심에 접근하면 되지만 연구용원자로에서는 항상 노심에 접근하여야 한다. 즉, 반감기가 짧은 동위원소의 생산, 실리콘 반도체 생산, 기타 조사시료의 장전 및 인출을 수시로 해야만 하기 때문이다. 따라서 노형은 언제나 노심의 접근이 용이한 개방수조형(Open Pool Type)으로 결정하였다. 또한, 개방수조형은 수조내에 많은 냉각수를 보유하여 노심의 열제거원 역할을 제공한다. 원자로의 안전 원칙은 비상시 신속하게 운전정지하고 원전연료의 잔열을 제거하는 것이다. 원자력발전소에서도 이 잔열을 제거하는 장치를 별도로 설치하고 안전주입계통도 필수적이거나, 개방수조형 연구로에서는 수조내의

표 1. 다목적연구로의 특성

노형	개방수조형
열출력	30MWth
핵연료	20W/0 농축 우라늄 U.Si-Al
냉각재	경수(H ₂ O)
반사체	중수(D ₂ O)
감속재	경수/중수
노심냉각	상향 강제대류
2차 냉각	냉각탑
원자로 건물	준격납(Confinement)

물만으로도 충분히 잔열을 제거할 수 있으므로 별도의 잔열제거장치가 필요없고 안전성도 충분히 확보할 수 있는 장점이 있다.

원자력발전소는 우라늄이 핵분열할 때 발생하는 에너지를 이용하나, 연구로에서는 핵분열시 생성되는 중성자를 이용하는 것이다. 다시 말해 연구로는 중성자 증식기 또는 중성자 발생기라고 말할 수 있다. 실제로 미국에서는 현재 추진중인 열출력 300MW급 연구로를 연구로라 부르지 않고 신형중성자원(Advanced Neutron Source)이라고 부른다. 중성자를 효과적으로 이용하려면 중성자의 발생을 가능한 좁은 공간에서 밀집시켜 발생시켜야 하고 발생한 중성자가 누출되거나 흡수되는 것을 방지하여야 한다. 이러한 요건을 만족시켜주는 것이 원자로에서 원전연료와 반사체이다.

즉, 높은 중성자밀도(속)를 얻기 위하여는 단위부피당 핵분열

수를 높여야 하며, 핵분열수를 높이기 위하여는 고농축 우라늄이 필수적이다. 따라서 대형 연구로에서는 90% 이상의 농축 우라늄을 사용하여 왔고, 현재 서울연구소에서 운전중인 TRIGA Mark III (열출력 2MW) 원자로도 70% 농축우라늄을 사용하고 있다. 그러나 원자력의 핵비확산 최우선정책이 수립된 이후 연구로에서도 20% 이하의 농축 우라늄만이 허용되고 있다. 이와 같이 대형연구로의 원전연료 농축도가 90% 이상에서 20% 이하로 낮아짐에 따라 같은 성능의 원전연료를 만들기 위해서는 우라늄 함량이 4.5 배 이상 증가되어야 한다. 저농축 고함량 핵연료중 그 성능이 입증되고 가장 많이 사용되고 있는 것이 우라늄과 실리콘의 합금이므로 다목적연구로에서는 우라늄 함량을 제일 많이 높일 수 있는 U.Si 형태의 연료를 사용한다.

연구로는 앞에서 언급한 모든 활용계획을 동시에 만족시키기 위해서 중성자속이 높고 넓은 공간이 필수적이다. 노심내에서 높은 중성자속을 얻을 수 있지만 공간은 상당히 제한적이다. 따라서 연구로에서는 중성자 흡수가 작은 물질로 원자로심을 적층하여 실험공간으로 이용한다. 이를 반사체라 하며 흑연, 베릴륨(Be), 중수 등이 사용되고 있다. 중수는 가격이 비싸고 운전유지가 어려운 단점이 있으나 그 특성은 탁월하여 다목적연구로에서는 반사

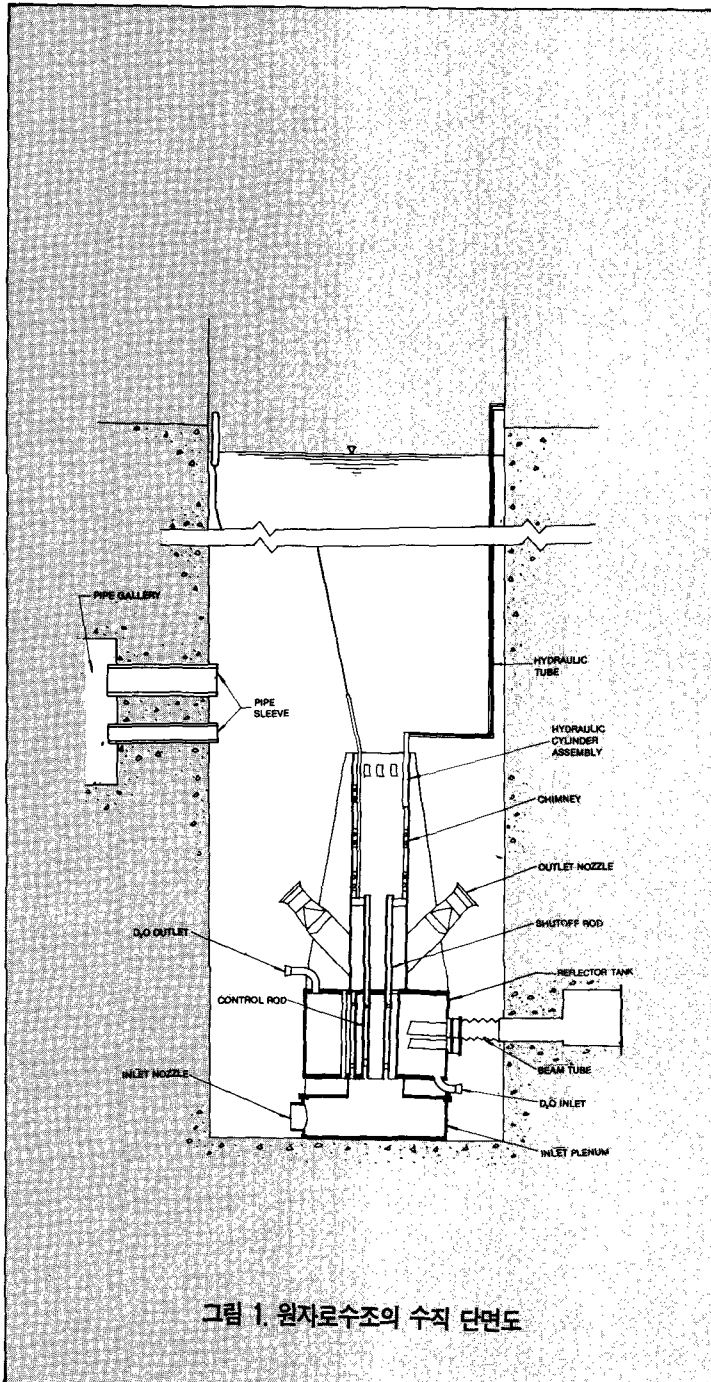


그림 1. 원자로수조의 수직 단면도

체로 중수를 선택하였고 반사체 탱크의 크기도 직경 2m, 높이 2m로 직경 50cm, 높이 70cm인 노심에 비해 충분한 실험 공간을 확보하였다.

대형연구로에서도 노심냉각은 안전성의 가장 중요한 변수이다. 일반적으로 소형(열출력 2MW 이하) 개방수조형 연구로에서는 수조형 원자로의 안전특성을 최대한 살리기 위해 자연대류로 노심을 냉각시키고 있으나 대형 연구로에서는 노심냉각을 위해 강제대류가 불가피하다. 그러나 강제대류시 냉각수의 흐름을 하향으로 하면 잔열제거시 자연대류의 이용이 어렵다. 왜냐하면 강제대류의 하향에서 자연대류의 상향으로 흐름의 방향이 변하는 과정에서 노심의 충분한 냉각을 보장할 수 없어 잔열제거시스템의 설치가 필요하기 때문이다.

반대로 강제대류의 방향을 상향으로 하면 하향시의 문제점을 제거할 수 있으나 냉각수가 노심을 통과할 때 생성된 방사성 물질인 질소(16N)가 붕괴하기 전에 수조 표면에 도달하므로 원자로 가동중에는 사람이 원자로 수조에 접근할 수 없고 원자로 이용도 불가능하게 된다. 이를 방지하는 방법으로는 노심 상부에 일정 높이의 침니(chimney)를 설치하고 냉각수중 일부를 우회시켜 침니 상단에서 내려오게 하여 노심을 통과한 냉각수가 수조 표면에 직접 올라가는 것을 방지할 수

있다. 다목적연구용원자로에서는 수조형 원자로 고유안전특성을 최대한 살리기 위하여 상향 강제대류 냉각과 침니 방법을 택하였다.

원자로

원자로로는 냉각수 인입통(Inlet Plenum), 그리드 판(Grid Plate), 반사체 탱크(Reflector Tank), 침니(Chimney) 및 유동관(Flow Tube) 등 5개의 주요부품으로 이루어졌다. [그림 1]은 원자로와 수조를 보여준다.

냉각수 인입통은 직경 2m, 높이가 60cm로 원자로를 지지하고 인입된 냉각수를 각 유동관에 균일하게 분배하는 역할을 한다. 이것은 스테인레스 강철로 만들어졌으며, 원자로 수조 바닥에 볼트로 고정되어 있다. 그리드판은 핵연료와 노심내 실험장치를 지지하는 스테인레스 강철판이다.

노심을 싸고 있는 반사체 탱크는 직경 2m, 높이가 1.2m로 중수가 채워지며 중성자 손실을 최소화하기 위하여 지르코늄 합금으로 만들었다. 이 반사체 탱크에는 여러 형태의 수직 조사공과 수평 빔튜브(Beam tube)가 있다. 침니는 알루미늄으로 만들어진 육각형으로 노심을 통과한 상향 냉각수와 하향 우회유량을 두개의 토출관을 통해 1차냉각계통으로 보내는 기능을 가지고 있다. 원전연

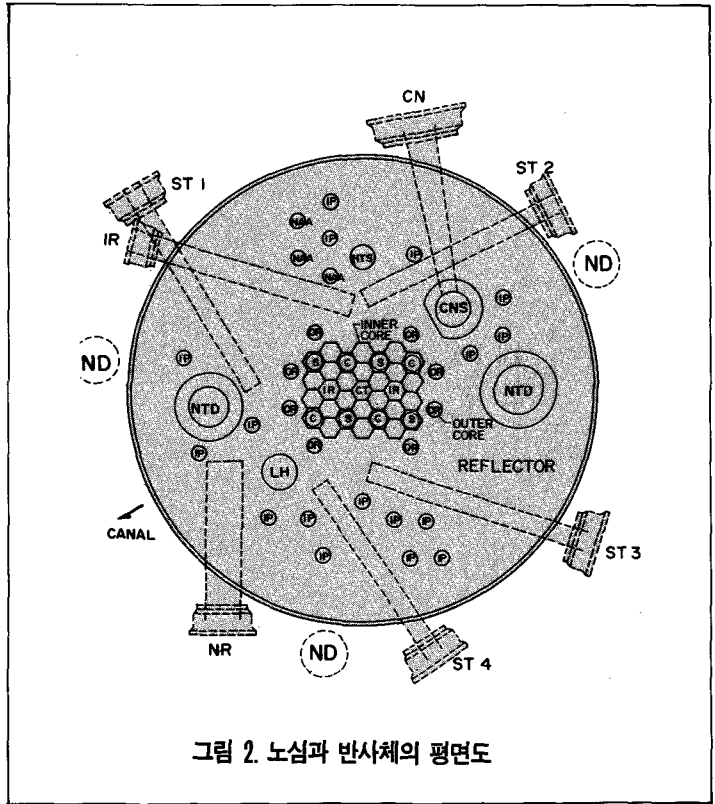


그림 2. 노심과 반사체의 평면도

료가 장전되는 유동관에는 6각형과 원통형이 있으며, 핵연료가 장전되지 않는 관은 조사관으로 쓰인다.

[그림 2]는 다목적연구용의 노심과 반사체의 단면도이다. 노심은 31개의 교체 가능한 유동관으로 이루어진 직사각형의 내부노심(Inner Core)과 8개의 고정 유동관으로 된 외부노심(Outer Core)으로 구성된다. 내부노심은 경수에 의해 냉각되고 감속되나 외부노심은 반사체내에 있으므로 경수로 냉각되고 중수에 의해 감속된다. 따라서 내부노심은 경수

로, 외부노심은 중수로의 특성을 가지므로 다양한 중성자 스펙트럼을 제공하여 실험의 효율을 높일 수 있다.

내부노심의 31개 유동관중 8개의 원통형 유동관은 4개 제어봉과 4개 정지봉의 안내관 역할을 하며 그 내부에는 18봉 핵연료 집합체가 장전된다. 23개의 육각형 유동관중 20개에는 36봉 원전연료 집합체가 장전되며, 나머지 3개는 속중성자속이 필요한 핵연료 및 노재료의 조사공으로 활용된다. 직사각형의 내부노심은 반사체로 중성자 누출이 크므로 같

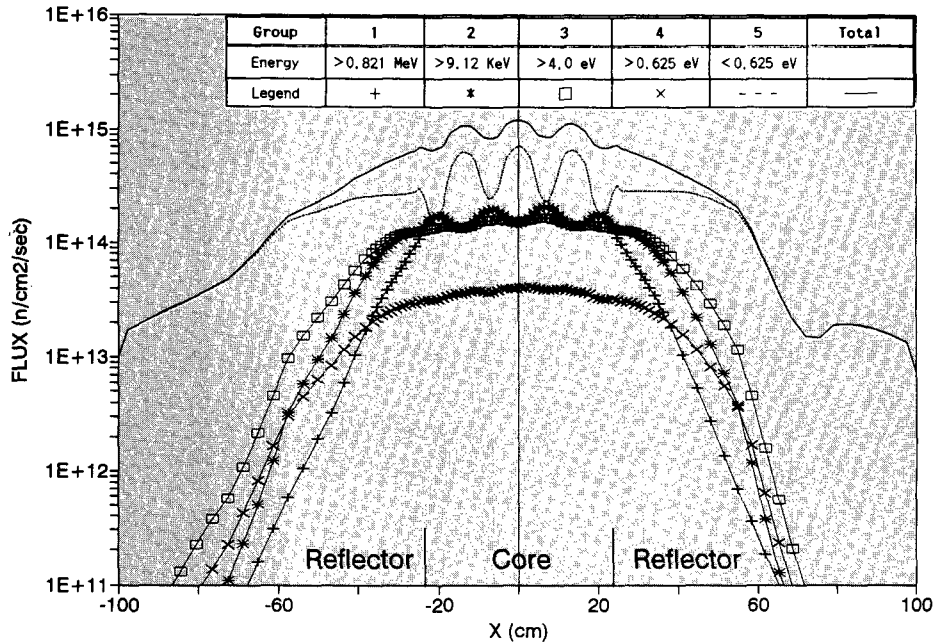


그림 3. 노심 및 반사체의 중성자 속 분포도

은 출력의 연구로에 비해 빔튜브에서 높은 중성자속을 얻을 수 있다. 외부노심의 4개 유동관에는 18봉 집합체가 장전되며, 나머지 4개의 유동관은 동위원소 생산용 시료조사에 사용할 예정이다. 특히 외부노심은 열외(Epithermal) 중성자속이 높아 효과적인 동위원소 생산에 기여할 것이다.

[그림 3]은 원자로에서 중성자속이 가장 높은 원자로 중심과 노심내 3개의 조사공 중심을 잇는 선상의 중성자 속이다. 다목적 연구로에서는 중성자속을 에너지 준위에 따라 5개의 군으로 분류

하여 계산한다. 노심영역에서 중성자속이 급격히 변화하는 이유는 3개의 조사공에는 물이 채워져 있어 열중성자속(5군)이 급증하고 속중성자속(1군)이 감소하기 때문이다. 반사체의 중간영역에서 열중성자속이 급격히 감소하는 것은 [그림 2]에서 보는 바와 같이 양쪽에 물이 채워진 대구경 조사공(NTD)이 있기 때문이다.

핵연료

다목적연구로의 원전연료는 발전용과 같은 봉형이다. 원전연료

심(Fuel Meat)은 U_3Si 와 알루미늄 분말을 혼합 압출시킨 봉형으로 우라늄 58.6W/O, 실리콘 2.4W/O, 알루미늄 39.0W/O로 구성된다. 피복재는 알루미늄으로 냉각능력과 강도를 향상시키기 위해 8개의 핀(Fin)을 두었다. 원전연료심은 길이가 700mm, 직경이 6.35mm이며, 피복재의 두께는 0.76mm이다. 원전연료심과 피복재는 고온에서 압출시켜 공간을 없애고 기계적인 결합으로 만들어졌다. 이 금속 원전연료는 열전달이 좋고, 내식성이 강하며, 팽창이 작고, 핵분열생성물에 대

한 포용력이 큰 것이 장점이다.

다목적연구로에서는 정육각형의 36봉 집합체와 원형의 18봉 집합체 2종류의 원전연료를 사용한다. 36봉 집합체의 외곽 연료봉을 제외하면 두 집합체에서는 같은 핵연료봉을 사용한다. 36봉 집합체의 외곽 연료봉은 연료봉심의 지름이 약 5.5mm로 약간 작다. 36봉 집합체의 원전연료봉은 육각형 배열로 봉간 거리는 12mm이다. 18봉 집합체는 동심원 배열로 안쪽에 6개, 바깥으로 12개의 핵연료봉이 둘러싸고 있다. 두 집합체 모두 중심에는 지르코늄 합금의 지지봉이 있다. 집합체당 우라늄의 양은 36봉 집합체가 2,200g, 18봉 집합체가 1,260g이다. [그림 4]는 두 집합체를 보여주고 있다.

원자로 냉각계통

[그림 5]는 다목적연구로의 원자로냉각계통도이다. 원자로심의 입 출구 냉각수의 설계 온도는 각각 35°C와 45°C이다. 원자로 수조에서 냉각수 인입통으로 들어온 냉각수는 수직으로 노심을 통과한 후 침니에 있는 2개의 토출관(Outlet)을 통해 수조밖에 있는 냉각계통으로 흘러간다. 이때 노심을 통과한 냉각수는 침니안의 상부에서 내려온 약 10%의 우회유량과 만나게 되는데 이 우회유량이 방사화된 노심냉각수의 상승을 방지한다.

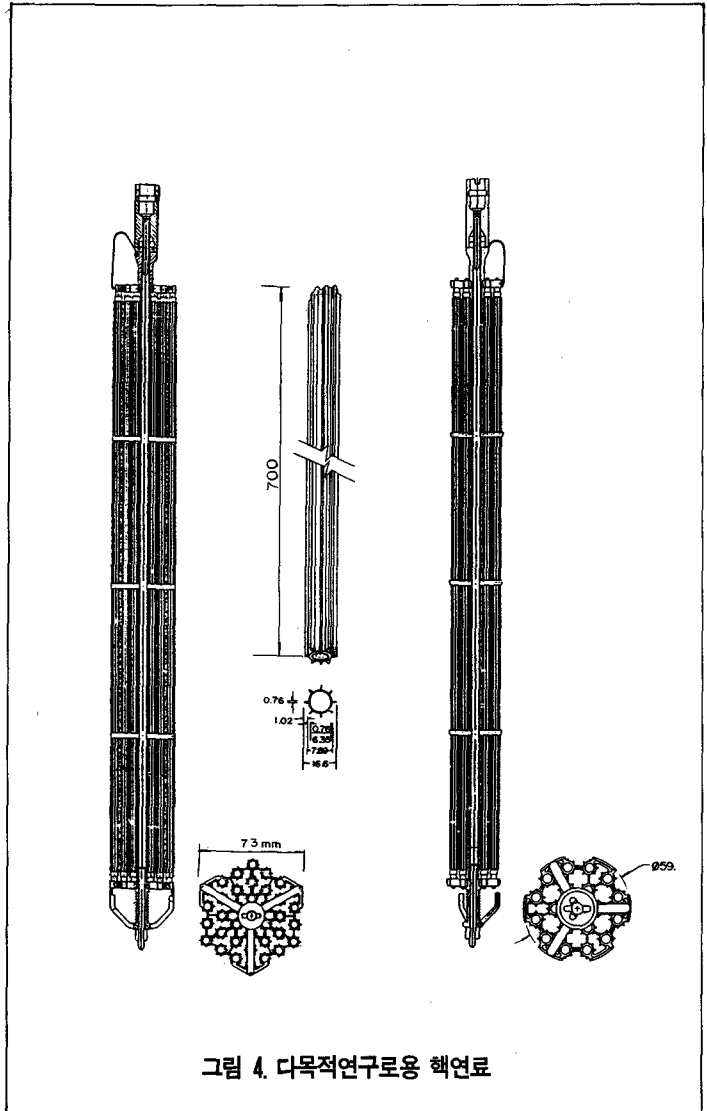


그림 4. 다목적연구용 핵연료

원자로냉각계통은 2개의 평행 회로로 이루어지며, 각 회로에는 용량이 50%인 펌프와 열교환기가 각각 1대씩 설치되어 있다. 펌프 흡입측 회로는 1대의 펌프 작동시에도 노심내의 균일한 냉각

수 흐름을 주기 위하여 2개의 배관으로 노심 출구에 연결된다. 열교환기를 통과하여 냉각된 냉각수는 한개의 공통 배관을 통해 노심으로 들어온다. 냉각계통을 2개의 회로로 구성한 것은 원자로

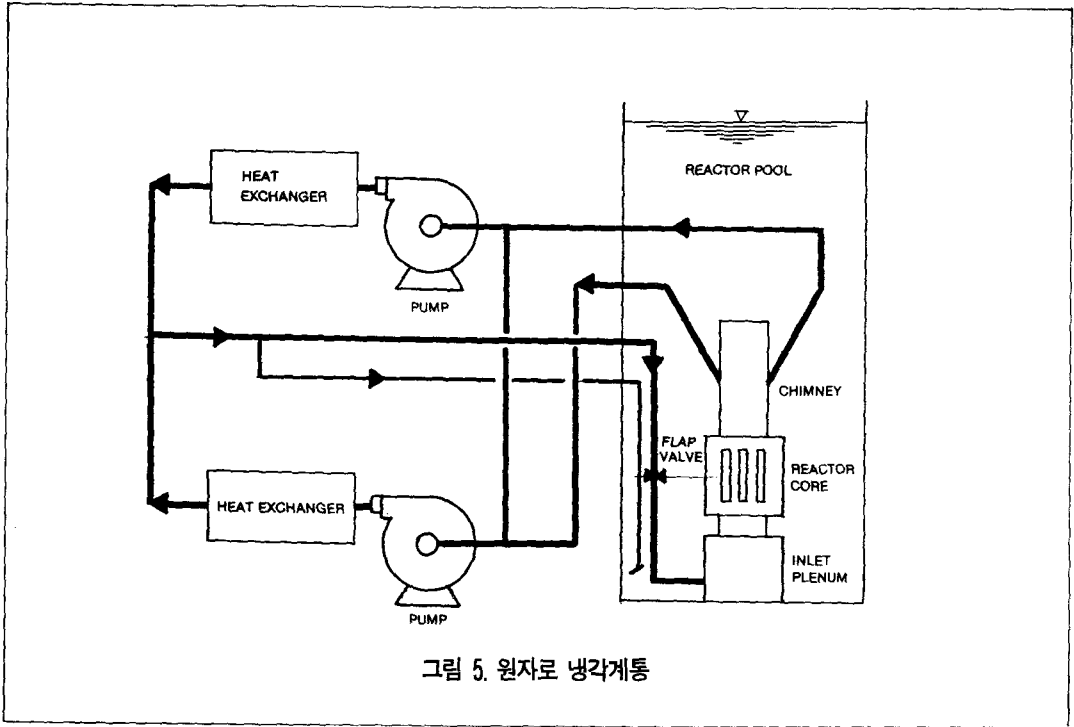


그림 5. 원자로 냉각계통

출력에 따른 적정한 냉각과 한대의 펌프 고장시에도 원자로를 계속 운전할 수 있도록 하기 위함이다.

원자로 정상가동이 중지되는 경우 잔열은 자연대류에 의해 제거된다. 자연대류에는 냉각계통을 통한 자연대류와 원자로 수조수의 자연대류가 있다. 원자로가 정지되고 원자로냉각펌프가 정지되면 냉각펌프에 달려 있는 관성바퀴(Flywheel)에 의해 유량이 서서히 감소한다. 관성바퀴에 의한 냉각기능이 상실되면 가장 상부에 설치된 열교환기의 열낙차에 의하여 자연대류가 형성되어 잔

열제거가 계속된다. 이때 정전 등의 원인으로 인해 2차냉각펌프도 정지하게 되면 2차냉각배관에 설치되어 있는 배수밸브(AOV)가 자동으로 열려서 2차 열제거원이 확보된다. 만약 냉각계통을 통한 잔열제거가 제 기능을 못하면 배관내의 냉각수 온도가 계속 상승하여 배관내의 냉각수와 수조수의 온도차는 점점 커지게 된다. 이 온도차에 의해 냉각인입배관에 설치한 플랩(Flap) 밸브가 열리고 찬 수조수가 노심으로 들어와 노심을 냉각시킨다. 노심을 냉각시킨 수조수는 침니를 통해 다시 원자로수조로 들어가므로 자

연대류가 형성된다.

원자로 보호계통과 제어계통

원자로보호계통은 원자로가 정상운전상태를 벗어나 사고상태로 발전하는 것을 방지하기 위해서 원자로를 비상정지시키는 안전계통이다. 원자로 안전과 관련되는 중요한 신호들을 정지변수로 지정하고 사고해석을 수행하여 정지설정이 결정되었다. 원자로 정지신호를 발생시키는 계측기와 논리회로는 모두 3중화되어 있고 2개 이상의 채널이 작동되면 4개의 정지봉이 중력에 의해 노심속

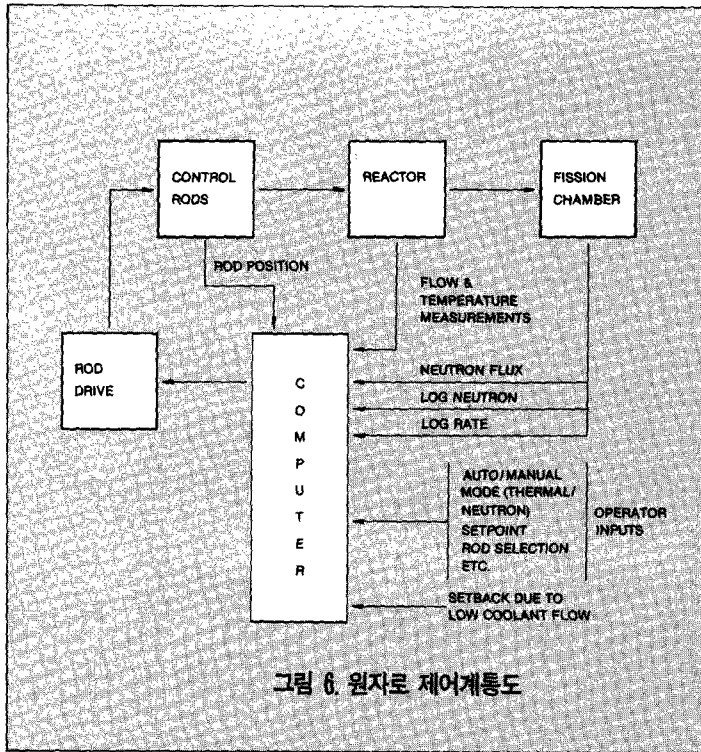


그림 6. 원자로 제어계통도

으로 자유낙하하여 신속하게 원자로를 안전 정지시킨다. 원자로 보호계통의 설계에 다중성, 독립성, 다양성, 동시성, 그리고 고장시 안전개념 등과 같은 안전성 설계기준을 엄격히 적용하였고 각 채널의 기기들은 내진검증 및 내환경 검증을 거친 고품질 등급을 사용함으로써 설계기준 사고시에도 고유의 안전기능을 유지할 수 있도록 설계되었다.

원자로제어계통은 원자로출력을 운전원의 설정값에 따라 유지시켜주는 계통으로서 공정제어용 컴퓨터를 이용한 디지털 제어방식이다. 원자로제어계통은 열출력 및 중성자출력 계측계기, 제어용 컴퓨터 및 단계전동기(Stepping Motor)를 이용하는 4개의 제어부 구동장치로서 구성되어

표 2 수직 조사공의 특성

위치	조사공		내경(cm)	중성자속(nu)		용도
	이름	수		속중성자 (>0.82MeV)	열중성자 (<0.625eV)	
노심	CT	1	7.44	2.10×10^{13}	4.40×10^{13}	핵연료, 재표시험
	IR	2	7.44	1.95×10^{14}	3.93×10^{14}	핵연료, 재표시험
	OR	4	6.00	2.25×10^{13}	3.36×10^{14}	동위원소 생산
반사체	NTD	2	22.0	6.9×10^{11}	3.9×10^{13}	반도체 생산
			18.0	1.1×10^{10}	6.2×10^{13}	
	CNS	1	16.0	1.3×10^{12}	1.7×10^{14}	냉중성자원
	LH	1	15.0	6.6×10^{11}	9.8×10^{13}	핵연료시험
	HTS	1	10.0	9.8×10^{11}	8.1×10^{13}	동위원소 생산
	NAA	3	6.0	1.3×10^{12}	1.6×10^{14}	중성자 방사화 분석
			6.0	6.3×10^{10}	3.6×10^{13}	
IP	17	6.0	1.4×10^9	2.4×10^{13}	동위원소 생산	
				2.2×10^{12}	1.95×10^{14}	

표 3. 빔튜브의 특성

빔튜브	형태	크기(cm)	전단의 중성자 특성	
			열중성자속 ($<0.625\text{eV}$)	카드뮴 비
ST1	직사각형	7×14	1.0×10^{14}	8.2
ST2	직사각형	7×14	2.4×10^{14}	11.3
ST3	직사각형	7×14	2.8×10^{14}	11.8
ST4	직사각형	7×14	2.2×10^{14}	14.0
CN	직사각형	6×15	1.4×10^{14}	34.0
NR	원 형	10	4.5×10^{13}	60.4
IR	원 형	10	2.8×10^{14}	6.7

있다. 원자로출력 제어 알고리즘은 열출력신호와 중성자 출력신호를 이용하여 노심의 반응도를 최적으로 제어할 수 있도록 구성하여 자동운전, 수동운전, 출력감발운전 등의 운전모드를 돕으로써 시험 또는 특수목적에 적합하도록 원자로 운전의 다양성을 최대한 고려하였다. 또한, 원자로 제어계통에 사용되는 출력 측정 기기들을 다중채널로 구성하였고, 제어용 컴퓨터도 입출력 장치들 뿐만 아니라 주컴퓨터 회로를 모두 2중화 구조로 설계 제작하여 계통의 가동률 및 신뢰도를 향상 시켰다.

원자로제어계통의 출력제어기능도는 [그림 6]과 같다.

실험공

수직조사공

다목적연구로는 노심과 반사체에 많은 수직 조사공이 있다 [그림 2 참조].

특히 중수가 들어 있는 반사체 탱크에는 크기가 다른 여러개의 조사공이 있어 용도에 따라 적절한 중성자속과 스펙트럼(spectrum)을 가진 조사공을 사용할 수 있다. 또한, 조사공은 노심과 떨어져 있으므로 노심의 영향을 최소화할 수 있으며, 조사공 사이에는 적당한 거리를 두었으므로 옆 조사공의 영향을 받지 않는다. 반사체에는 총 25개의 조사공이 있으며, 조사공의 내경은 6~22cm로 다양하다. 조사공중 17개는 동위원 소생산에, 3개는 중성자 방사화분석에, 2개는 반도체 생산에, 그리고 핵연료시험 냉중성자원과 수력이송장치에 각각 1개의 조사공이 사용될 것이다. 노심에 모두 7개의 유동관을 수직 조사관에 할애하였다. 내부노심에 3개, 외부노심에 4개이다. 노심 내 조사공은 핵연료 및 재료의 조사시험과 동위원소 생산에 활용될 것이다. 이들 수직 조사공

의 특성과 용도를 요약한 것이 [표 2]이다.

빔튜브(Beam tube)

다목적연구로는 반사체내에 7개의 수평 빔튜브가 있다. 중성자공의 방향은 중성자 빔(beam) 실험의 효과를 낮추는 속중성자와 감마선을 줄이면서 열중성자를 최대한 얻을 수 있도록 노심의 접선방향으로 하였다[그림 2 참조]. 표준 빔튜브(ST1, ST2, ST3, ST4)는 직사각형으로 중성자 분광기가 설치된다. 냉중성자원 수직공에 연결된 CN 빔튜브는 냉중성자 연구에 기여할 것이다. NR 빔튜브에는 중성자 래디오그래피 장치가 설치되며, IR 빔튜브는 대형시료의 조사에 활용할 계획이다.

맺 음 말

원자력 발전의 기술개발에 있어서 연구용원자로의 몫은 절대적이다. 다목적연구로는 최대 $5 \times 10^{14} \text{n/cm}^2 \text{-sec}$ 의 열중성자속과 다양하고 충분한 실험공을 갖춘 세계 유수의 연구로이다. 또한, 2개의 독립된 원자로 정지장치, 자연대류에 의한 잔열제거 능력, 부온도계수 등 안전성을 완비한 원자로이다. 따라서 다목적연구로는 원자력 관련 연구개발은 물론 산업분야 등 광범위한 연구개발의 발전에 크게 기여할 것으로 기대한다.