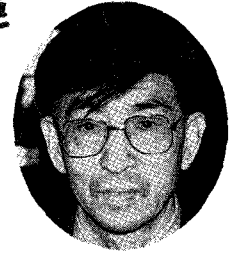


中國에서의 地域난방로 운전경험과 연구개발



王大中
(중국청화대학교 교수)

1. 서 론

1986년 3월에 원자력기술연구소(INET)가 개발한 5MW 실험용 난방원자로(NHR-5)의 건설이 결정됐다. 약 3년반에 걸친 건설공사 끝에 NHR-5는 1989년 11월 3일 임계상태에 도달하였고, 1989년 12월 16일 전출력 가동에 들어가 그후 첫번째 겨울에 100일 이상 계속 운전되었으며, 지금은 두번째 겨울을 맞이하여 원자력에 의한 난방을 성공적으로 실시하고 있다. 현재까지의 가동실적으로 보아 NHR-5의 가동성능은 우수하다.

NHR-5가 성공적으로 가동되자 중국에서는 약 20개 도시와 전력회사에서 난방원자로(NHR) 건설에 많은 관심을 가지고 있다. 국가에서는 Jilin화학공업공사를 위한 200MW급 실증용 난방원자로(NHR-200)의 사전 타당성 조사를 허가하였으며, 현재 타당성 조사가 진행되고 있다. 중국의 NHR 개발전망은 매우 밝다.

2. NHR 개발목표 및 안전요건

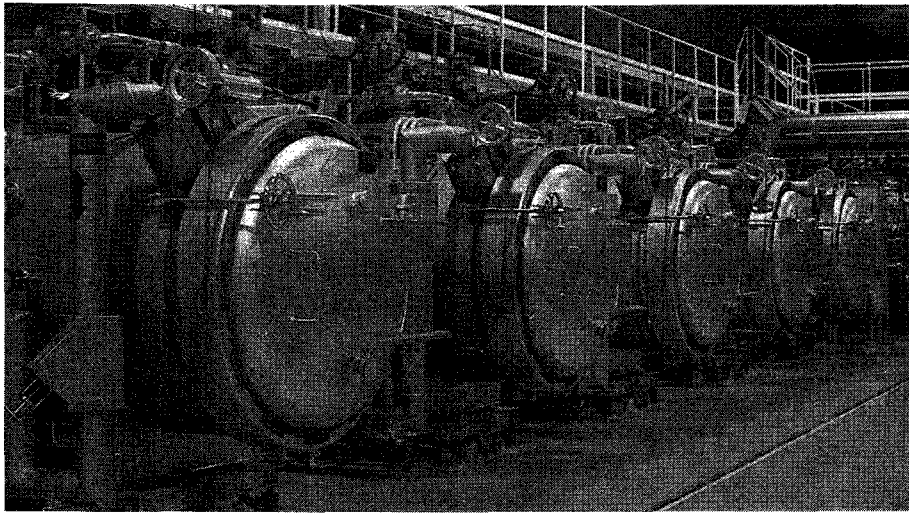
NHR 개발과 관련된 기본적인 문제는 안전과

경제이다. 그리고 안전과 경제는 상호 밀접하게 연관되어 있다. NHR의 안전은 발전소의 안전이 공학적인 안전특성에 주로 의존하고 있는 오늘날의 원자력발전소 설계원리에 근거를 두어서는 안된다. 그래서 NHR설계에는 새로운 개념을 도입하여 고유한 안전을 가지며, 단순화된 시스템으로 신뢰성있게 가동할 수 있고, 유지보수가 간편하고 비용이 적게 드는 NHR을 만들어야 한다. 무엇보다도 NHR에는 고유한 안전이 주요한 바람직한 특성이다. 이러한 NHR에는 다음과 같은 특징이 있다.

- (1) 마이너스온도 반응계수가 크다.
- (2) 자연적인 대류 또는 전도작용에 의하여 잔여열(잉여열)이 제거된다.
- (3) 가동 압력이 낮다.
- (4) 설계상으로 냉각재상실사고의 가능성이 없다.
- (5) 고온에서 방사능이 억제된다.
- (6) 대응조치에 충분할 정도로 유예기간이 길다.

3. NHR-5의 설계상 특징

NHR은 상기한 원리에 입각하여 고유한 안전



특징을 가지도록 설계되어 있다. 이 원자로로는 용기형 경수 원자로로서 통합형이고 자연순환 식이고 자체 가압기능을 가지고 있다. 이 원자로로는 4개의 1차열교환기가 원자로 용기안에 들어있으며 용기의 상부에서 불활성가스 및 증기가 시스템의 압력을 유지하고 있다. 1차 루프에는 펌프가 없다. 냉각재는 “더운”부분과 “차가운”부분간의 밀도차이에 의하여 순환한다.

자연적으로 순환되는 용량을 증가하기 위하여 노심출구 상부에는 긴 수직관(라이저)이 있다. 냉각재가 원자로 중심에서 열을 흡수하고 라이저(수직관)를 지나 1차열교환기속으로 들어간다. 거기서 운반된 열이 중간 루프속에 있는 물로 이전된다. 마지막으로 열은 중간 열교환기를 통하여 가열 그리드로 전달된다. 말하자면 NHR-5의 열운반시스템은 3단계 루프를 가지고 있다.

NHR-5의 주요 특징은 다음과 같다.

◦ 통합된 배열, 자체압력유지 및 2중용기구조

NHR-5는 통합된 배열, 자체 압력유지 및 1차시스템에서의 자연적인 순환으로 설계되어 있다. 원자로용기에 아주 가깝게 밀폐가 설계되어 있으며, 높은 압력에 견디도록 되어있다. 이러한 특징을 근거로 NHR-5의 노심은 어떠한 설계하에서도 기본적인 사고를 노출시키지 않기 때문에 NHR에는 비상노심냉각시스템이 필요치 않다.

◦ 자연순환에 의한 노심냉각

잔여열(잉여열)제거시스템(RHRS)은 가장

안전한 시스템이다. 이 시스템은 수동적인 패턴으로 설계되어 있다. 잉여열은 3중 루프를 통하여 끝에 있는 열싱크 속으로 분산된다.

◦ 수압구동제어봉시스템

NHR-5는 13개의 제어봉을 구동하는 수압 시스템을 채택하고 있다. 제어봉은 전력공급의 상실, 압력저하, 파이프 파열 및 펌프고장 사고시에 자동적으로 원자로 노심으로 떨어져 들어간다.

◦ 낮은 운전계수와 큰 안전여유도

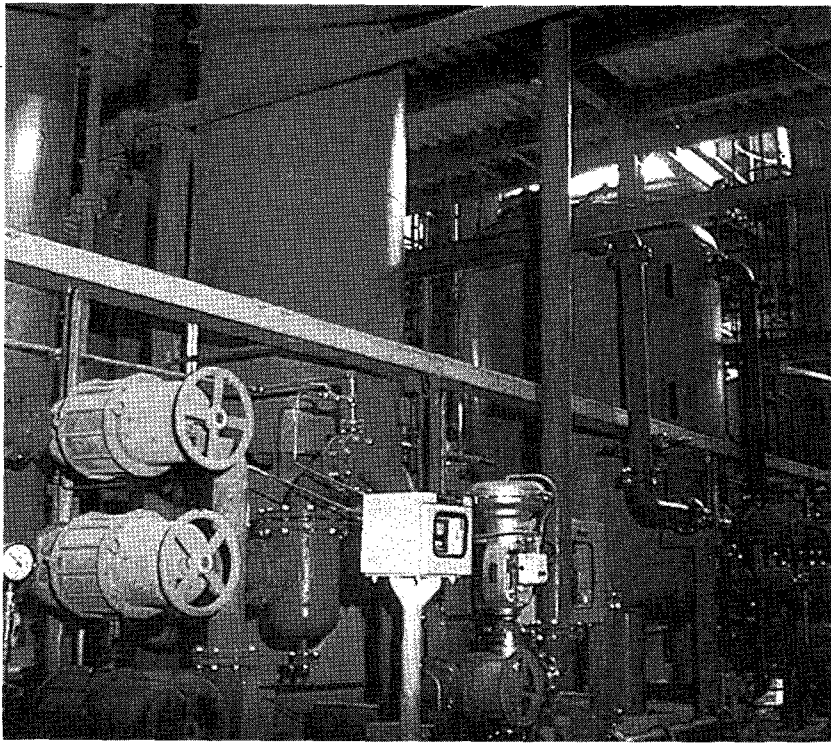
NHR-5는 저온, 저압 및 저출력밀도에서 작동하기 때문에 잠재에너지 및 잉여열 밀도가 보다 작다. 핵, 열수력 및 구조설계에서 안전여유도가 크고, 부(負)반응피드백이 크다. 이러한 모든 것 때문에 이 원자로로는 더 안전하게 그리고 더 신뢰성있게 가동되는 것이다.

4. NHR-5의 안전특성

NHR-5는 설계상의 특징 때문에 신뢰성있고, 안전한 정지, 적절한 노심 냉각유지 및 예기치않은 누출에서 나오는 방사능의 방호가 보장될 수 있다. 결정론적 및 확률론적 평가를 실시한 결과 전반적인 안전특성은 우수한 것으로 나타났다.

결정론적 분석에서 다음 4가지 범주의 초기 사건을 고려하였다.

- (1) 일차계통에서의 열제거의 증가 또는 감소
- (2) 원자로 냉각재의 증가 또는 감소



- (3) 비정상적 출력분포 또는 반응도 교란
 - (4) 발전소에서의 방사능 누출
- 총 37개 사고를 평가하였다.

상기한 모든 분석결과에 의하면 NHR-5는 어떠한 설계상의 사고가 발생하더라도 매우 안전하다. 이점을 다음에 나열한다.

- 최소비등한계(DNBR)가 항상 안전한계보다 크다. 연료 요소 피복재는 과열되거나 손상되지 않는다.

- 일차계통에서의 최대압력은 설계상의 압력보다 훨씬 낮으며 냉각재 압력경계의 건전성이 적절히 유지된다. 원자로용기의 안전밸브는 소외전원상실이 일어날때까지는 열리지 않는다.

- 노심이 결코 노출되지 않는다. 적절한 연료 냉각이 보장된다.

- 최대 핵연료 엔탈피는 안전한계보다 낮다.

- 방사능누출은 규정된 한계치보다 훨씬 적다.

NHR-5의 중대사고에 대처하는 능력을 나타내기 위하여 설계를 근거로 한 사고 이외에 소외전원상실과 함께 붕소주입시스템고장과 같은 사고에 대한 분석도 실시하였다. 분석결과 원자로 노심은 24시간 이상 냉각재하에 두게 된다는 것이 나타나고 있다. 그러므로 유예기간은 운전자가 사고 결과를 완화하기 위한 대응조치를 취하기에 충분하다. 그결과 노심용융사고 발

생 가능성은 없다.

5. NHR-5의 가동성능

NHR-5가 1989년 12월 12일 가동된 이래 가동상의 특징을 예견하기 위하여 다음과 같은 실험을 실시하였다. 그 결과 NHR-5는 자체조절 및 자체안정의 성능이 우수하다는 것이 나타났다.

1989년 12월 12일 NHR-5가 출력운전에 들어간 이래 다음과 같은 실험을 실시하였으며, 그결과는 우수하였다.

◦ 정상운전에서의 교란실험

이 테스트로 개스나 냉각재가 일차계통속으로 들어가고 물이 중간 루프나 가열 그리드 속에 들어감으로써 발생하는 고장이 조사된다.

실험결과 상기한 고장하에서 원자로 출력, 중심 인렛 및 아웃렛 온도와 같은 주요시스템상의 매개변수가 약간 혼란이 있는 후에 즉시 원래의 값을 회복한다는 것이 나타났다.

◦ 부하추종실험

이 테스트에서 중간 열교환기를 지나는 흐름 속도는 부하감소를 시뮬레이터하는 원래 값의 4분의 1만큼 감소한다. 이로 인하여 노심온도가 상승하고 부(負)피드백으로 인하여 출력수준이

감소하며 결국 원자로의 출력수준은 부하수요와 맞아떨어진다.

부하 증가 시의 과도전류는 상기한 과정과는 반대된다. 실험결과 부하가 40% 이상 변화하더라도 원자로의 출력수준은 운전자의 작동없이도 자체조절능력을 근거로 적절히 부하를 따라가며 주요 가동 매개변수상의 변화는 여전히 가동한계내에 머문다는 것이 나타났다.

◦ 자체안정성 실험

이 테스트는 반응도 교란하에서의 원자로의 성능을 나타내기 위한 것이다. 소개된 최대반응은 2mk이다. 이것은 가장 높은 수치의 보상 로드가 순간적으로 2계단 올라가는 것과 같은 것이다.

이 경우 원자로 출력수준 및 노심 평균온도는 8%와 40℃로 각기 상승하고 원자로는 새로운 조건에서 안전하게 가동되며 모든 매개변수는 가동한계내에 머문다.

◦ ATWSTEST

주요 열 싱크ATWS의 상실 실험이 출력수준 40%하에서 실시되었다. 이 경우 반응도의 부(負)온도계수가 크고 열용량이 크기 때문에 원자로 출력은 자동적으로 매우 낮은 수준까지 감소하였다. 그래서 중심 아웃렛 온도는 50℃가량 올라갔다.

6. NHR-5의 주요기술에 대한 연구개발

NHR의 연구개발중에 기술적인 문제가 많이 해결되었다. 중요한 항목은 다음과 같다.

◦ 두가지 상 흐름 안정성에 대한 실험연구

NHR-5가 약간 끊으면서 가동될 때 일정한 조건하에 있는 원자로에서는 밀도와 불안이 일어날 수 있다. 그러므로 일련의 실험조사와 이론분석을 실시하였다. 1985년에 실험 루프를 설치하였다. 1986년말에 많은 실험을 실시하였는데 그 실험을 통하여 중요한 결과가 몇가지 나

왔으며 압력, 인렛트 서브쿨링(Subcooling) 및 저항, 출력밀도, 라이저(Riser) 높이, 병열채널 배열 등을 포함한 시스템의 열수력학상의 시스템 매개변수의 영향이 발견되었다. 이 실험결과는 컴퓨터 코드 NUFREQ 및 RETRAN-02를 이용하여 얻은 계산된 예견과 일치하고 있다.

◦ 수압구동제어봉설비의 실험

새로운 종류의 CR구동시스템을 개발하기 위하여 일련의 테스트루프를 설정하였으며 거기에는 실내온도 테스트루프, 고온 테스트루프, 초음파 CR포지션 지표 테스트 기구 및 모든 13CR 및 내부중심을 가진 포괄적인 테스트루프가 포함된다.

상기한 실험에서 얻은 결과에 의하면 새로운 종류의 CR구동시스템의 설계는 적절하며 그 작품은 믿을 만한 것이다.

◦ 붕소 주입과정의 실험

붕소 주입시스템은 원자로의 제 2정지 시스템이다. 붕산액의 밀도가 경수의 밀도보다 크기 때문에 그리고 원자로 노심의 자연순환의 속도가 보다 느리기 때문에 붕산액 주입중의 대량 운반과정에 대한 실험을 실시하였다. 그 실험결과 붕산액을 원자로속에 안전하게 주입시킬 수 있고 원자로를 효과적으로 정지시킬 수 있다는 것이 나타났다.

그외에 1차열교환기에 대한 흐름저항에 대한 실험은 작은 LOCA에 대한 실험과 같은 다른 실험도 실시하였다.

7. 결 론

많은 첨단 설계특징을 가진 NHR-5는 그 안전특성이 뛰어나다. 그 성공적인 운영은 중국이 세계의 난방원자로기술의 선진대열에 서있으며 대형 상업용 NHR건설을 위한 기술기반이 확보되었다는 것을 시사하고있다.

NHR은 더욱 안전하고 깨끗하고 경제적인 에너지원이 될 것이며 중국의 미래의 에너지시스템에서 중요한 위치를 차지할 것으로 기대된다.