

《해 설》

개량형 및 피동형 CANDU의 개발 현황

장순홍·백원필
(한국과학기술원)

1. 서 론

CANDU형 원자력발전소는 캐나다에서 개발된 가압중수로(Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR)형 원전으로서, 30년 전 Nuclear Power Demonstration(NPD) 원전에서 최초로 상업운전을 개시하였다. 그 후 캐나다를 중심으로 인도, 파키스탄, 한국, 루마니아, 아르헨티나 등에서 건설이 계속되어 1991년말 현재는 25기가 상업 운전 중이고, 8기가 건설 중인 것으로 나타나고 있다(인도 등에서 자체 개발한 경우 제외). [1]

CANDU 원자로는 원자로압력용기(Reactor Pressure Vessel) 대신 다수의 압력관(Pressure Tube)을 채택하고 있으며, 여러가지 고유한 특성을 지니고 있다. 개량형 및 피동형 CANDU개발 현황을 살펴보기에 앞서 상업용 CANDU 원자로가 지니는 공통적인 주요 특성들을 요약하면 다음과 같다. [2, 3]

(a) 압력관 개념을 채택하여 수백 개의 압력관이 커다란 원통형 용기인 칼란드리아(Calandria) 안에 수평으로 배열되어 있으며, 압력관 내를 흐르는 고압의 냉각재와 칼란드리아 안의 저압(대기압) 냉각재가 분리되어 있다.

(b) 중수를 사용함으로써 중성자 경제성이 매우 높으므로 천연우라늄을 비롯하여 다양한 핵연료 사이클이 가능해지고, 실제 현재의 모든 CANDU 원자로에서는 천연우라늄이 핵연료로 사용된다.

(c) 운전 중 핵연료 교환(On-line Refueling)을 수행한다. 운전 중 핵연료 교환은 CANDU 원자로의 잉여반응도가 작은 까닭 때문에 생긴 불가피한 선택이면서도, 이에 따른 여러 잇점이 있다. 즉 핵연료 재장전을 위한 발전소 정지가 필요하지 않으므로 가동율이 높아지고, 노심 내 반응도 및 중성자속 분포를 조절할 수 있는 수단이 되며, 손상된 핵연료의 교환을 용이하게 하고, 또한 운전 중 검사의 가능성도 가져다 준다.

(d) 전 운전 영역에 걸쳐 노심 반응도의 변화가 작다. 따라서 요구되는 제어봉 반응도가 낮고, 과도상태에서의 국부적인 연료봉 과도출력의 가능성이 낮다.

(e) 냉각재 및 감속재 온도계수가 비록 작기는 하지만 양의 값을 가지며, 특히 냉각재상실사고의 발생시 노심 반응도가 증가한다. 따라서 원자로 안전 정지시스템의 작동이 매우 신속해야 하며 고도의 신뢰도를 지녀야 한다.

(f) 0에 가까운 반응도계수는 안전성 측면에서 특별한 고려를 요구하는 반면, 노심 출력의 자동 제어를 매우 편리하게 한다.

(g) 중성자밀도가 매우 높은 영역을 일차냉각재 압력경계인 압력관이 관통하므로, 압력관의 건전성 문제가 매우 중요하다.

(h) 냉각재와 감속재가 분리되어 있고 감속재 압력이 대기압이므로, 냉각재상실사고시 감속재가 궁극적인 열제거원의 역할을 수행할 가능성이 있다.

CANDU 원자로의 개량 및 설계 혁신은 위에 열거한 여러 특성들 중에서 장점은 더욱 살리고 문제점은 보완하는 방향으로 추구하고 있으며, 설계 개발의 기본 목적은 1)안전성 증진, 2)건설비 절감 및 3) 운전 성능 향상이 될 것이다.

경수로와 마찬가지로 CANDU 원자로에 대해서도 개량형 및 피동형에 대한 연구 개발이 진행되고 있다. 이 글에서는 우선 개량형 중수로로 볼 수 있는 CANDU 3의 설계 특성을 소개하고, 다음에 현재 고려되고 있는 대표적인 피동형 CANDU의 설계 개념을 논의하고자 한다. 여기서는 입수 가능한 자료의 제약으로 피상적인 소개에 그치고 있음을 미리 밝혀 둔다.

2. CANDU 3[3-6]

2.1. 설계 목적

CANDU 3는 순전기출력이 450MWe 정도인 최신의 설계로서, 1982년부터 개발이 시작되었으며, 현재는 상세 설계가 약 70% 정도 진척된 것으로 보고되어 있다. CANDU 3는 월성 1,2호기와 같은 CANDU 6에서 입증된 설계를 대부분 따르면서, 부분적인 설계 개선을 추구하고, 동시에 발전소 설계 및 건설 과정의 향상에 중점을 두고 있다. CANDU 3의 주요한 설계 목적 또는 요건은 다음과 같다.

- 1) 발전소 안전성 향상
- 2) 수명기간 동안 94% 이상의 이용률
- 3) 건설공기 단축

- 4) 기존의 입증된 제동 기기 및 기술 이용
- 5) 주요 기기(핵연료 채널, 증기발생기 등)의 교체 또는 성능 향상에 소요되는 기간이 90일 이하
- 6) 작업자의 방사선 피폭 감소
- 7) 석탄화력에 대해 경쟁력이 있는 발전 단가

2.2. 주요 설계변수

표 1은 CANDU 3의 주요 설계변수를 CANDU 6와 비교하고 있다.

2.3 설계 특성

CANDU 3 원자력발전소의 주요 계통들은 CANDU 6에서 입증된 설계 개념 및 설비들을 거의 그대로 이용하고 있다. 특히 원자로 설계는 낮아진 출력에 따라 핵연료 채널의 수가 232개로 줄어들고 동시에 부수적인 계통들의 수량이나 용량 또는 크기가 변경되었을 뿐이며, 핵연료 채널 및 핵연료 다발은 같은 것을 사용하고 있다. 반면에 일차 열전달계통(Primary Heat Transport System)은 회로 수가 2개

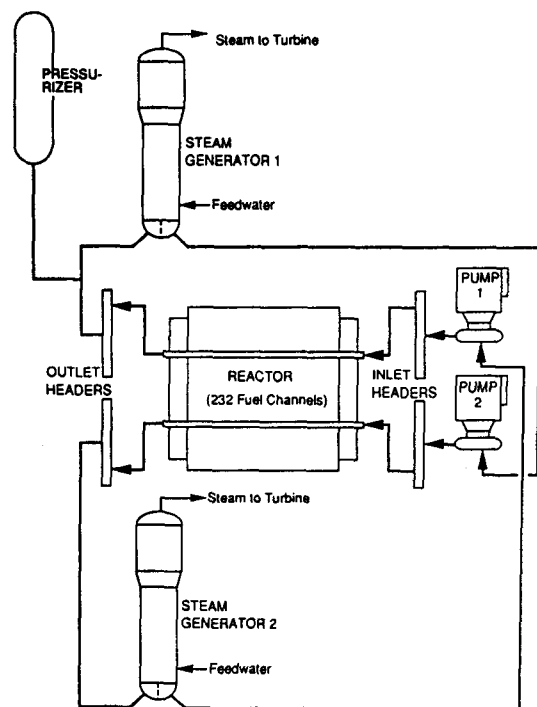


그림 1. Candu 3 일차 열전달계통

표 1. CANDU 3와 CANDU 6의 설계변수 비교

Parameters	CANDU 3	CANDU 6
Power Output		
Total Fission Heat, MWt	1,440	2,143
Net Electrical Output, MWe	450	600
Reactor and Fuel		
Reactor Type	Horizontal Pressure Tube	
Coolant	Pressurized Heavy Water	
Moderator	Heavy Water	
Fuel	Natural UO ₂	
Number of Fuel Channels	232	380
Fuel Form	Fuel Bundle Assembly of 37 Elements	
Number of Bundles per Fuel Channel	12	12
Maximum Channel Flow, kg/s	27.0	24.0
Heat Transport System		
Number of Loops	1	2
Number of Steam Generators	2	4
Steam Generator Type	Vertical U-Tube with Integral Steam Drum and Preheater	
Heat Transfer Area per SG, m ²	~4,000	3,200
Number of Heat Transport Pumps	2	4
Heat Transport Pump Type	Vertical, Centrifugal, Single Suction, Double Discharge	
Motor Rating Per Pump	~9,400	6,700
Reactor Outlet Header Pressure, MPa(g)	9.9	9.9
Reactor Outlet Temperature, °C	310	310
Reactor Coolant Flow, Mg/s	5.3	7.44
Steam Temperature(Nominal), °C	260	260
Steam Quality(Minimum), %	99.75	99.75
Steam Pressure, MPa(g)	4.6	4.6

에서 1개로 줄어들었고, 이에 따라 증기발생기와 펌프의 수량이 2개씩으로 줄어들고, 이들의 위치도 재배치되어 냉각재 출구 헤더(Outlet Header) 쪽에는 증기발생기가, 입구 헤더(Inlet Header)쪽에는 펌프가 위치하게 되었다(그림 1).

CANDU 3의 설계 개선은 주요 계통의 본격적인 변경보다는 발전소 건물 배치의 최적화, 모듈화 설계의 극대화, 발전소 설계 공정의 전산화 및 최적화 등을 통하여 건설공기를 줄이고, 건설비를 절감하며, 높은 품질을 확보하는데 보다 중점을 두고 있다. 여기에는 물론 그룹 1 계통과 그룹 2 계통간의 물리

적, 기능적인 분리를 보다 확실하게 하고, 주요 기기에 대한 교체 및 대폭적인 보수를 짧은 기간 안에 허용할 수 있도록 건물이 설계된다. CANDU 3의 건설 기간은 38개월 정도로 기존 CANDU 발전소의 54개월에 비해 크게 줄어드는 것으로 평가되고 있다(그림 2). 그리고 발전소 제어시스템도 기존 설계에 비해 크게 개선되었다.

3. 피동형 CANDU[8,9]

상세 설계가 진행되고 있는 CANDU 3와는 달리

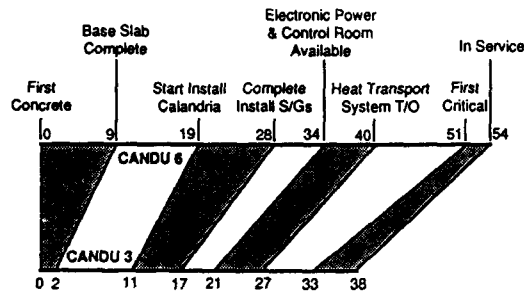


그림 2. CANDU 3와 CANDU 6의 건설기간 비교

피동형 CANDU(AECL에서는 Advanced CANDU라고 함)는 현재 기본개념을 정립하는 단계이다. 따라서 구체적인 설계 개념이 확정되어 있는 것도 아니고, 어떤 방향으로 발전되어 갈지도 분명하지 않다. 그러나 AECL의 Chalk River 연구소에서는 Advanced CANDU 연구에 상당한 비중을 두어 연구조직을 확대해가고 있으며, 몇 가지 설계 개념들에 대

한 평가가 이미 수행되었다.

Advanced CANDU에서는 기본적으로 피동형 경수로에 대한 EPRI의 설계요건[9]들을 충족시키는 방향으로 추진되고 있다. 그러나 AP600이나 SBWR 등 피동형 경수로와는 달리, 능동계통에도 중요한 안전 기능을 부여하고 있으며, 다만 능동계통이 작동되지 않을 경우 피동계통만으로도 발전소를 안전한 상태로 유지시킬 수 있도록 추구하고 있다. 특히 냉각재와 감속재가 분리되어 있어서 냉각재 상실사고가 발생하더라도 많은 양의 저압 저온 감속재가 핵연료채널 주위에 존재하는 특성을 살려서 감속재에 의한 피동 노심냉각 기능을 확보하는데 많은 관심이 모아지고 있다.

그림 3은 최근 연구되고 있는 Advanced CANDU의 냉각 계통을 예시하고 있다[8]. 여기서는 피동 냉각을 달성하기 위해 금속 격납용기를 채택하고 격납용기 상부와 벽면 주위에 다량의 냉각수(H_2O)를 구비

표 2. ATR 발전소의 주요 설계 변수

Parameters	Fugen	Demonstration Plant
General		
Thermal Power, MWt	557	1,930
Electric Power, MWe	165	606
Moderator	Heavy Water	
Coolant	Boiling Light Water	
Fuel		
Number of Fuel Assemblies	224	616
Number of Rods in an Assembly	28	36
Fuel Material	MOX, UO ₂	MOX
Enrichment, %	2.0	3.3
Average Burnup, MWD/MTU	17,000	31,000
Reactor		
Arrangement	Vertical	Vertical
Core Diameter/Height, m	4.053/3.700	6.721/3.700
Lattice Pitch, mm	240	240
Pressure Tube I.D., m	117.8	117.8
Calandria Tank O.D./Height, m	7.95/5.04	9.40/4.85
Primary Cooling System		
Number of Loops	2	2
Steam Pressure, kg/cm ²	68	69
Steam Flow, tons/h	910	3,300

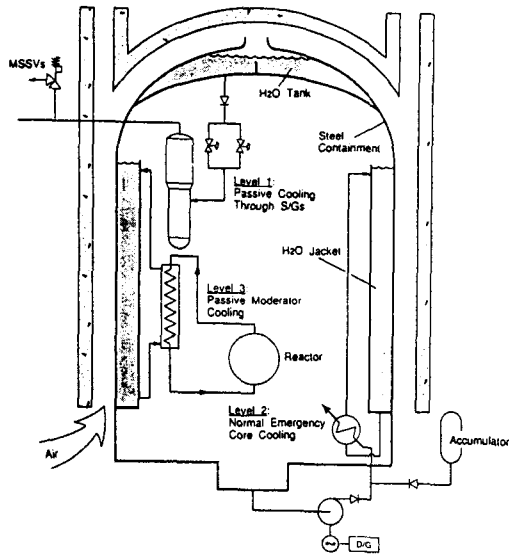


그림 3. Advanced CANDU의 3단계 노심 냉각 개념

하고 있는 점이 외견상 기존 CANDU와 크게 다르다. 경수로와 마찬가지로 CANDU의 경우도 냉각요건을 결정짓는 것은 냉각재 상실사고(Loss of Coolant Accident, LOCA)와 2차측 열 제거원 상실사고(Loss of Heat Sink Accident)이다. 이들 사고에 대비한 노심 냉각은 다음 3 단계로 수행된다.

제 1단계 (증기발생기 피동 열제거) : 제 1 단계는 증기발생기에 정상적인 급수가 공급되지 않을 경우를 대비한 것이다. 이 경우에는 격납용기 상부의 물탱크로부터 냉각수가 중력에 의해 증기발생기 2차측에 공급되어 증발하면서 적어도 3일 동안의 붕괴열을 제거할 수 있도록 하고 있다. 여기서 중력에 의한 냉각수 공급이 가능하기 위해서는 2차측의 감압이 충분히 이루어져야 한다. 운전의 편의를 위해 기존의 잔열 제거계통과 보조 급수계통은 유지되어야 할 것으로 평가하고 있다.

제 2단계 (비상노심냉각수 주입) : 제 2 단계는 일차 열전달계통이 파손되었을 경우를 대비한 비상냉각수 주입계통(Emergency Coolant Injection System)으로, 기존의 CANDU 6에서와 유사하게 수행된다.

제 3단계 (감속재에 의한 냉각) : 제 3 단계는 일차 열전달계통이 제대로 작동하지 않고, 비상 노심 냉각수 주입계통도 실패할 경우에 대비하여 피동적인 감속재 냉각에 의해 핵연료 채널을 보호하자는 개념이

다. 피동 감속재 냉각은 D_2O 감속재와 H_2O 냉각수 간의 자연순환에 의한 열전달에 의해 이루어지며, 초기에 $55^{\circ}C$ 정도로 유지되는 Water Jacket 내의 다량의 냉각수 온도가 상승하면서 노심 붕괴열을 흡수하고, 이 온도가 $82^{\circ}C$ 정도에 이르면 노심 붕괴열과 피동 격납용기계통에 의한 열제거율이 평형을 이루는 것으로 보고되고 있다.

그림 3의 개념이 현재 연구되고 있는 Advanced CANDU 개념의 전부는 아니며, 이 밖에도 여러가지 신개념들이 연구되고 있다. 특히 독특한 진공 격납용기 개념을 채택하여 냉각재 상실사고 등으로 핵분열 생성물들이 격납용기로 방출되더라도 피동적인 방법으로 환경 누출을 방지하는 방법도 활발하게 연구되고 있다. 또한 피동 감속재 냉각계통은 극심한 LOCA라도 핵연료 채널을 보호할 수 있는 장점이 있지만 핵연료봉 자체를 보호하지는 못하므로, 핵연료봉으로부터 감속재로의 열전달을 증진시키는 메커니즘에 대한 연구도 수행되고 있다.

4. 기타 개발 연구

전체적으로 볼 때 현재 캐나다에서의 CANDU 원자로에 대한 연구는 새로운 원자로형에 대한 연구보다는 기존 CANDU의 부분적인 성능 향상에 보다 집중되어 있다고 할 수 있다. 여기서 특히 핵연료 및 핵연료 채널에 있어서의 설계 개선(저농축 연료를 사용하는 방안 포함)과 발전소 제어시스템의 개선이 중요하게 추구하고 있는 것으로 판단된다.

한편 일본에서는 저농축 혼합핵연료(MOX)를 사용하고, 감속재는 중수, 냉각재는 비등 경수로인 ATR(Advanced Thermal Reactor)이 개발되고 있다. 표 2는 1979년부터 상업운전에 들어간 원형로 Fugen과 1997년 상업 운전을 목표로 건설이 추진 중인 실증로의 주요 설계 변수를 보여주고 있다. 이 ATR에서는 압력관들이 수직으로 배열되어 있고, 운전 중 핵연료 교환을 하지 않는다.

5. 결 론

지금까지 개량형 및 피동형 CANDU 개발 현황을 간략하게 살펴보았다. CANDU 3의 경우 기존 CANDU 6와 비교할 때 많은 설계 개선이 이루어지

고 있으나, 설계 개념이나 안전계통 등에 있어서의 큰 차이는 없는 것으로 판단되며, 설계, 제작, 건설 및 운전에서 효율성 증대에 큰 개선이 이루어진 것으로 판단된다.

Advanced CANDU의 경우는 최근 연구가 활발히 진행되어 몇 가지 유망한 개념들이 도출되었으나, 아직은 개념 정립 단계에 머물고 있다. 그러나 CANDU형 원전이 지니는 고유한 장점들과 잘 결합될 경우 안전성을 현저히 향상시킬 수 있는 여지가 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. World Nuclear Industry Handbook 1992, Special Issue of *Nucl. Eng. Int.* (January 1992).
2. International Atomic Energy Agency, Status of Advanced Technology and Design for Water Cooled Reactors: Heavy Water Reactors, IAEA-TECDOC-510 (July 1989).
3. J.J. Lipsett and J.T. Dunn, "Advanced Technology and Design for Heavy-Water Reactors," *IAEA Bulletin*, Vol. 31, No. 3, 22-24 (1989).
4. Atomic Energy of Canada Limited, CANDU 3 Technical Outline, Rev. 9 (September 1989).
5. B.A. Kakaria, "Advanced in CANDU Reactor Technology," *Proc. of the 6th KAIF/KNS Annual Conf.*, April 15-17 1991, Seoul, 117-136.
6. B.A. Kakaria, "Construction of CANDU Nuclear Power Plants," *Proc. of the 7th KAIF/KNS Annual Conf.*, April 21-22, 1991, Seoul, 621-637.
7. Atomic Energy of Canada Limited, CANDU Nuclear Power Station
8. N.J. Spinks et al., "Passive Heat Rejection Concepts for CANDU Reactors," *Proc. of the 7th KAIF/KNS Annual Conf.*, April 21-22, 1991, Seoul, 389-395.
9. N.J. Spinks and J.E. Dick, "Passive Design Options for CANDU," *ANS Trans.*, 705-706 (1991).
10. Electric Power Research Institute, Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document (March 1990).