

원자력발전과 핵연료

Nuclear Power Generation and Nuclear Fuel



글 | 박 쫘 永

(Park, Jin Young)

원자력발전기술사, 공조냉동기계기술사,
공학박사, 한전원자력연료(주) 생산본부 실장.
E-mail: jypark@mail.knfc.co.kr

The importance of the nuclear energy as one of the national energy sources, safety consideration of the nuclear power plants and status of nuclear power generation and nuclear fuel cycle in Korea are discussed.

목 차

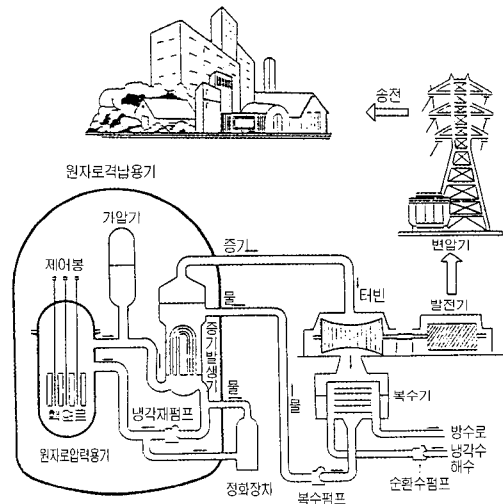
1. 에너지원으로서의 원자력 발전
2. 원자력 발전소의 안전방호
3. 국내에 도입 및 개발된 발전용 원자로
4. 핵연료 주기

1. 에너지원으로서의 원자력 발전

인류가 근 세기까지 연료로 사용되던 나무는 열 효율과 생산성 때문에, 수력과 풍력은 입지와 계절적 일기 변화 때문에, 조류나 파고 발전은 막대한 투자비와 해양의 생태계 변화 때문에, 석유는 비싸서, 그리고 석탄은 타고남은 재와 아황산 가스나 중금속의 환경 피해 때문에, 원자력은 고도의 기술과 막대한 초기 투자와 방사능의 폐해가 문제된다. 이들 에너지원들을 가장 대량으로 가장 값싸고 장기적으로 공급할 수 있는가를 기준으로 비교하면 원자력이 가장 유리하며, 원자력의 최대 결점인 방사능 폐해도 현재의 기술력으로 충분히 제어할 수 있다.

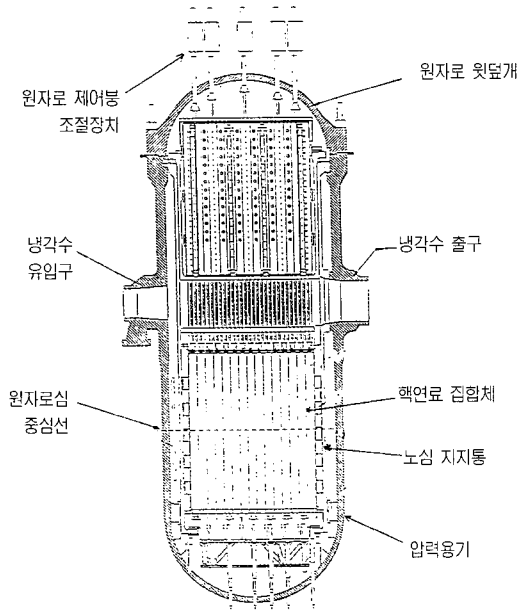
영국은 원자폭탄을 개발하던 기술로 천연우라늄 금속연료를 흑연덩어리 속에서 핵반응을 유발시켜 발생된 에너지를 탄산가스로 냉각시키는 기체냉각식원자로(GCR: Gas Cooled Reactor)를 개발하여 세계 최초(1962년)로 상업발전을 시작

하였다. 미국은 원자력 잠수함의 고출력원자로의 기술을 활용하여 가압경수로(PWR: Pressurized Water Reactor)〈그림 1, 그림 2〉와 비등수형경수로(BWR: Boiling Water Reactor)를 개발하였다. 캐나다는 플루토늄 생산용 원자로를 모방하여 가압중수형원자로(PHWR: Pressurized Heavy Water Reactor, 일명 CANDU)〈그림 3〉을 개발하였다. 그 외에도 수십 가지의 원자로

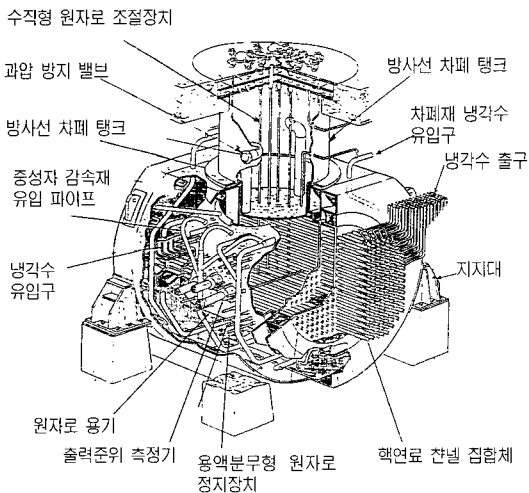


〈그림 1〉 가압경수형(PWR) 원자력발전소의 구성

들이 개발되었으나, 현재는 PWR과 BWR 및 CANDU가 주요 동력원이 되고 있으며, 우리나라에서는 PWR과 CANDU로 발전하고 있다.



〈그림 2〉 가압경수로(PWR)의 단면도



〈그림 3〉 가압중수로(PHWR, 일명 CANDU)의 구조

2. 원자력 발전소의 안전방호

가압경수로의 경우, 핵연료에서 핵반응열을 발생하면서 원자력 발전의 가장 취약점인 막대한 방사능이 발생한다. 우선 핵연료봉의 피복관으로 튼튼한 재료를 사용하여 방사능 물질이 냉각수로의 누설을 방지하며, 설혹 방사능 물질이 누설되어도 1차 냉각계통 밖으로의 누설을 방지하며, 설혹 1차 냉각계통에서 1차 냉각수가 누설되어도 원자로 외부 차폐콘크리트 벽으로 방어하며, 다시 1차 냉각계통을 둘러싼 원자로 건물 내부 철판으로 방어하고, 원자로 건물 외부 차폐벽으로 차폐하는 등의 5 중의 방호개념으로 설계되어 있다. 또한, 원자력 발전소의 설계는 물론이고, 원자로를 매번 가동하기 전에도 원자로 노심의 안전성을 철저히 해석하여 어떠한 일이 있더라도 대단위 사고가 일어나지 않도록 예방한다.

3. 국내에 도입 및 개발된 발전용 원자<표 1>

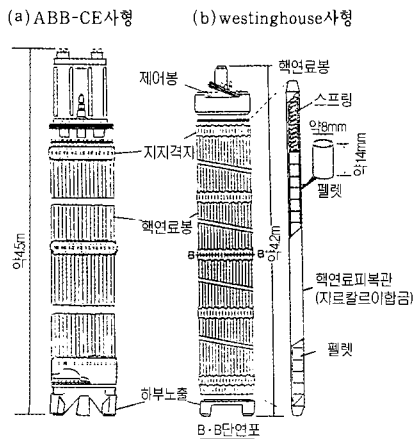
1978년 4월부터 가동한 고리원자력발전소 1호기는 Westinghouse사형 PWR에 14×14의 핵연료집합체 〈그림 4〉 (a) 121개를 장전하고, 핵반응열로 경수(H₂O)를 약 350℃로 가열시켜서 열교환기를 거쳐 발생된 증기로 터빈을 돌려서 약 60만kW의 전기를 발전하고 있으며, 매년 약 1/3의 핵연료집합체를 교체한다. 1977년부터 고리 2호기가 16×16의 핵연료집합체를 사용하여 가동되고 있다. 고리 1호기가 Turn-Key 형태로 건설되었으나, 계속 건설되면서 손쉬운 토목공사나 부대시설부터 시작하여 조금씩 국산화 비율을 높여갔다.

1983년 4월부터 월성원자력 1호기, 1997년과 1998년과 1999년부터 월성 2, 3, 4호기가 CANDU의 360개의 채널 당 12개씩 총 4320개의 핵연료다발 〈그림 5〉를 장전하여 가동하면서 매일 12개 내지 18개의 핵연료를 교체하면서 70

만kW의 전기를 발전하고 있다. CANDU에는 비싼 중수(D2O; 물에 0.015%가 들어 있음, 98% 정도로 농축함)를 사용하고 있다. 1985년과 1986년에 고리 3, 4호기가, 1986년과 1987년에 영광 1, 2호기가, 1988년부터 울진 1, 2호기가 가동되었는데 핵연료집합체는 고리 1, 2호기용에 비하여 가로, 세로가 넓고 17×17의 핵연료봉 배열이지만 기본적인 설계개념은 유사하다.

1987년도부터 한국원자력연구소와 한국원자력기술주식회사 및 한국중공업주식회사가 한전과 정부의 적극적인 지원을 받아 영광 3, 4호기 건설과 병행하여 핵심기술인 핵증기공급계통(NSSS; Nuclear Steam Supply System)을 ABB-CE사와 공동으로 설계/제작하면서 기술전수를 받아 1995년과 1996년에 영광 3, 4호기를 준공하여 각각 100만kW를 발전하였으며, 기술자립도는 95%에 이르게 되었다.

그 후 울진 3, 4호기를 건설하면서 NSSS계통의 설계 개선을 통해 한국형원자로로 자리 잡으면서 1998년과 1999년부터 울진 3, 4호기가 각각 100만kW의 전기를 발전하고 있으며, 영광 5, 6호기와 울진 5, 6호기가 건설되고 있으며, KEDO사업의 일환으로 북한의 신포에도 2기가 건설되고 있다.



〈그림 4〉 가압경수형(PWR) 핵연료집합체



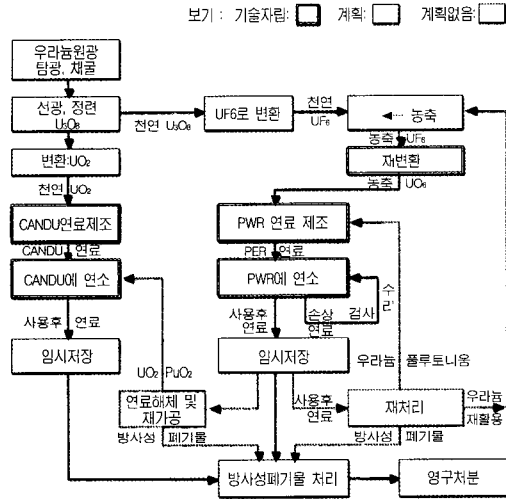
〈그림 5〉 가압중수형(PWR) 핵연료다발

〈표 1〉 국내 원자력발전소 현황

호기	용량 (만kW)	원자로형 및 설계사	준공년월
고리 1호	58.7	PWR, Westinghouse	'78.4
" 2호	65		'83.7
" 3,4호	95		'85.9, '86.4
월성 1호	67.9	PHWR, AECL	'83.4
" 2호	70		'97.6
" 3,4호	71.3		'98.7, '99.12
영광 1,2호	95	PWR, Westinghouse	'86.8, '87.6
" 3,4호	100	PWR, 한중/한원(CE)	'95.3, '96.3
" 5,6호	100	PWR, 한중/한기(CE)	'02.6, '02.12
울진 1,2호	95	PWR, Framatom	'88.9
" 3,4호	100	PWR, 한중/한기(CE)	'98.9, '99.12
" 5,6호	100		'03.2, '04.2

4. 핵연료 주기

전세계적으로 다양한 원자로가 가동되고 다양한 핵연료가 사용되고 있으나, 여기에서는 우리나라에서 가동되고 있는 발전용 원자로에 사용되는 핵연료를 중심으로 설명하기로 한다. 우리나라는 경제성과 핵비확산운동을 지지하면서 핵연료 주기 〈그림 6〉의 일부분만 자립 혹은 계획하고 있다.



〈그림 6〉 핵연료 주기 및 국내 기술 자립 계획

우라늄 원광, 정광

우리나라에도 우라늄 광상이 발견되었으나 우라늄의 품위가 낮아 해외로부터 우라늄 원광을 수입하여, 선광 및 제련의 일관 처리과정에서 막대한 폐기물과 물류비용이 소요되기 때문에, 외국에 의뢰하여 U₃O₈ 형태로 도입하고 있다.

우라늄 변환과 농축

국내에서 12기가 가동 중이고 앞으로도 건설될 PWR은 농축이산화우라늄 핵연료를 사용한다. 천연우라늄의 동위원소에는 U-239가 99%, U-235는 0.72%가 있는데, 쉽게 핵분열 하는 것은 U-235이므로 핵분열성을 높이려고 농축하여 U-235의 함량을 4% 이상으로 높인다. 천연 U₃O₈을 UF₆로의 변환은 경제성 때문에, 우라늄 농축은 경제성은 있으나 핵비확산운동을 지지하여 외국에 의뢰하고 있다.

PWR용 핵연료 제조/설계 기술 개발

고리 1호기의 건설이 구체화되면서부터 핵연료의 자급자족을 위해 핵연료의 국산화를 추진하다가, 1985년부터 독일에서 한전원자력연료(주)는 Westinghouse사형 PWR핵연료 〈그림 4〉(a)의 가공 설비와 기술의 도입을, 한국원자력연구소

는 설계기술을 도입하여 1989년도부터 기술을 자립하였다. 그런데, ABB-CE사형 PWR원자력 발전소를 국산화하는 과정에서 핵연료 〈그림 4〉(b)는 Westinghouse사형 핵연료와 제조 공정은 유사하였으므로 국내 기술로 개발하였으나, 원자로의 제어방법과 구조적 차이 때문에 핵연료 설계 기술을 별도로 도입하였다.

PWR용 핵연료 제조

한전원자력연료(주)가 농축UF₆(약 4.5%의 U-235)를 도입하여 UO₂로 재변환한 후 PWR용 핵연료 국내 소요분(약 230ton) 전량 가공하여 공급하고 있다. 농축이산화우라늄을 연필 굵기로 압분하고 1700℃에서 4시간 이상 소결한 후 표면을 연마(UO₂ 소결체)한 다음 약 4m 길이의 Zircaloy-4 피복관에 넣고 한쪽에 약 25cm 길이의 스프링을 넣고 He을 450psi 압력으로 주입한 후 밀봉하여 핵연료봉을 만든다. 이들 핵연료봉을 해당 원자로의 내부 구조에 맞게 설계/제작된 골격체에 고리 1호기용이면 14×14, 고리 2호기나 ABB-CE형이면 16×16, 고리 3, 4, 영광 1, 3 및 울진 1, 2호기용이면 17×17의 배열로 끼워서 조립하면 핵연료집합체(Fuel Assembly)가 완성되는 것이다(〈표 2〉).

〈표 2〉 국내 PWR 원자력발전소에서 사용되는 핵연료 제원

설계형태	14×14 OFA	16×16 SFA	17×17 V5H	16×16 SFA
원 설계자	Westinghouse			ABB-CE
집합체 가로(mm)	197.0	197.2	214.0	207.13
집합체 길이(mm)	4062	4058	4063	4528
집합체 무게(kg)	519.2	589	663.1	651
집합체당 연료봉	179	235	264	236
원자로내 집합체	121	121	157	177
연료봉 피복재	Zircaloy-4			
연료봉 직경(mm)	10.16	9.50	9.50	9.70
연료봉 길이(mm)	3868	3844	3865.9	4094

PWR 원자로 노심의 설계

원자로는 인류가 개발한 동력용 열원 중에 최고 밀도의 열을 발생시키는 장치이다. 원자폭탄과 같은 순간적인 폭발을 억제하면서 기계적 안전성과 더불어 방사성물질의 누출을 방지하고 계획된 기간 동안 계획된 열출력을 발생시켜 이용할 수 있어야 한다. 그러기 위해서는 원자로가 가동되고 있는 동안 핵반응을 언제나 제어(핵설계)할 수 있고, 발생된 핵분열생성열을 효율적으로 원자로에서 제거(열수력설계)하고, 방사성물질의 누설을 예방(연료봉 건전성 해석)하는 한편, 핵연료의 기계 구조적 안전성(기계설계)과 발생된 열의 전달을 유지하면서 어떠한 일이 발생하여도 안전성을 보장(안전해석)해야 한다. 이를 위해 다양한 전산코드(Computer Code)를 활용하여 설계하고 검증한다.

CANDU형 연료 제조

현재, 한전원자력연료(주)가 천연우라늄(0.7%의 U-235) 정광(U_3O_8)을 정제하여 변환한 천연 이산화우라늄(UO_2)을 도입하여 국내 4기의 CANDU에 소요 핵연료를 전량(약 400ton) 공급하고 있다. 천연 이산화우라늄을 굵은 연필 굵기로 압분하고 1700°C 이상의 온도에서 4시간 이상 소결한 후 무심연마기로 표면을 연마한 다음, 표면에 일정한 크기의 간격체가 용접되어 있는 약 50cm 길이의 Zircaloy-4 피복관에 넣고 양쪽을 밀봉하여 연료봉을 만든다. 37개의 연료봉의 양쪽에 여러 모양의 구멍이 뚫린 원형 판을 점용접하면 핵연료다발(Fuel Bundle)이 완성된다.

사용후 핵연료의 처리

원자력 발전소에서 연소하고 배출된 사용후핵

연료는 고도의 방사능을 방출하므로 현재로서는 임시로 원자력 발전소의 저장조에 보관하고 있으며 영구적인 처분방안을 모색하고 있다. 그런데 사용후 핵연료에는 핵분열성 우라늄(약 0.8%의 U-235)이나 플루토늄(약 0.7%의 Pu-239)을 함유하고 있으므로 불란서나 영국에서는 화학적으로 재처리하여 이들 핵분열성 물질들을 추출하여 혼합핵연료(MOX)를 만들어 사용하고 있다.

사용후 PWR핵연료를 기계적으로 해체한 후 방사성 물질만 제거하여 핵연료(DUPIC, Tandem Cycle 등)로 재가공하여 CANDU에서 재 활용하는 방법도 있다. 우리나라는 핵비확산운동을 지지하여 핵연료의 재처리는 고려하지 않고 있다.

Fuel Service

원자로를 가동하는 중에 핵연료의 손상여부를 냉각수의 방사능을 분석하여 판정하며, 수중의 핵연료를 수중 TV Camera로 외관상의 건전성을 검사하고, 초음파 탐상을 하여 핵연료봉의 피복관이 파손되어 방사능 물질의 누설 여부를 판정한다. 이들 기술은 국내에서 이미 자립하여 활용하고 있다.

만일 계속 사용할 핵연료가 손상되었을 경우 수리하여 재사용 하는데 수리기술을 원자력 선진국들이 독점하고 있었으나 최근에 국내 기술로 자립하였다. 추후, 핵연료의 설계 및 제조기술을 개선하여 건전성과 효율을 높이기 위한 자료를 제공하기 위해 핵연료의 방사선에 의한 제원의 변화를 측정하기 위한 정밀제원측정/검사 기술을 개발할 예정이다.

(원고 접수일 2000. 5. 12)