

CANDU 원전수명관리 현황 및 전망

A Review of CANDU Plant Lifetime Management

황경모, 신태은

한국전력기술주식회사
경기도 용인시 구성면 마북리 360-9

송택호, 정일석

한국전력공사, 전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

최근 동북아 몇몇 국가를 제외하고는 신규 원전건설이 거의 이루어지지 않고 있으며, 기존 원전도 점차 노후되는 등 전반적으로 원전산업이 침체되고 있다. 이에 대한 대처방안으로서, 세계 각국에서는 기존 원전의 적절한 수명관리를 통하여 실제 운전수명을 최적으로 연장하고 운전성능을 향상시키기 위한 연구를 활발히 수행중이다. 이의 일환으로 본 고에서는 국내에 보유하고 있는 CANDU 원전을 대상으로 한 수명관리 연구 수행시를 대비하여 CANDU 원전 선도국인 캐나다의 수명관리기술 관련 동향과 전망, 수행방법과 개략적인 결과, 발전사업자 동향 및 연장운전 관련 규제동향 등을 소개하였다.

ABSTRACT

In recent years, plant lifetime management(PLIM) including life extension has become the focus of the nuclear industry worldwide due to a number of factors which have arisen over the past decade : new siting difficulties, imbalance of power supply and demand, and high construction costs. In order to solve the problems, the PLIM program is being developed for the purpose of life extension and improvement of plant availability and safety. This paper describes the current activities and prospects of AECL and CANDU utilities, the conceptual evaluation results for the degradation mechanisms, and PLIM regulatory aspects. In addition, this paper provides the applicability of CANDU PLIM to Wolsong Unit 1 which has been operated for 17 years.

1. 서론

최근 전세계적으로 20년 이상 운전되고 있는 원전이 110여개 호기에 달하고 신규원전에 대한 부지확보와 막대한 투자비, 원전안전에 대한 불신, 반핵단체 활동 등이 원전산업에 공통된 난제로 등장하고 있다. 이러한 문제에 대응하기 위한 노력으로서, 기존 원전의 적절한 수명관리를 통하여 실제 운전수명을 최적으로 연장하고 운전성능을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행중이다. 외국의 경우에는 미국을 중심으로 원전 수명연장 연구가 1980년대 초반부터 활발하게 진행되어 왔으며, 기술 및 경제적으로 타당성이 있음을 입증하여 CCNPP와 Oconee 원전이 1998년에 인허가갱신 신청을 한 상태이다. 또한 영국의 Calder Hall과 Chapelcross, 일본의 Mihama 1호기와 Tsuruga 1호기, 캐나다의 Gentilly-2와 Point Lepreau 등의 원전에서 현재 연장운전에 돌입했거나 잠정적으로 연장운전이 결정된 상태이며, 이외 다수의 발전소에서 연장운전 관련 프로젝트가 수행되고 있다.

국내에서도 이미 고리 1호기를 대상으로 수행한 설계수명 변경 관련 1단계 원전수명관리 연구결과, 타당성이 있음을 확인하여 현재 정밀평가 단계인 2단계 연구를 수행하고 있으며, 후속 원전으로 1997년 현재 17년째 가동중인 월성 1호기의 연장운전 여부에 대한 타당성 검토가 신중하게 요구되고 있다. CANDU 원전수명관리 연구 수행시, 국내 시범 발전소인 고리 1호기를 대상으로 한 연구경험을 활용하되 가압경수로(PWR)형인 고리 1호기와 가압중수로(CANDU)형인 월성 1호기의 원자로 형태, 운전방식, 운전조건, 규제 등의 차이를 반영해야 할 것이다.

따라서 본 고에서는 향후 월성 1호기를 대상으로 한 CANDU 원전수명관리 연구를 수행할 때를 대비하여 CANDU 원전수명관리 연구를 이미 수행하고 있는 캐나다의 연구배경 및 현황, 수행방법, 발전사업자 연구동향, 연장운전 관련 규제동향 등을 소개한다.

2. CANDU 원전수명관리 배경

1999년 현재 전세계적으로 상업운전 중인 CANDU 원전은 19개 호기이고 캐나다의 Pickering A 4개 호기와 Bruce A 4개 호기가 운전정지 중이다. 그리고 신규로 건설중인 원전은 국내 월성 4호기를 포함하여 5개 호기이다. 이들 중 캐나다에는 현재 14기의 CANDU 원전이 가동중이다. CANDU 원전에서 발생한 대표적인 사고 사례를 보면, 1984년 8월 Pickering 2호기의 정상 운전중 압력튜브 손상사고, 1986년 Bruce 2호기의 원자로 정지 중 압력튜브 손상사고, 1992년 11월 Bruce A의 기동중 제어상실 사고, 1994년 12월 Pickering 원전의 Small LOCA, 1996년 12월 Point Lepreau의 원자로 냉각재 공급자관 파단사고 등이 있으며, 최근에는 Pickering, Point Lepreau, Bruce 원전에서 증기발생기 튜브누설로 인한 사고가 발생하는 등 여러 기기에서 손상사고가 발생하고 있다[1]. 표 1은 현재 전세계 CANDU형 원전의 운전현황을 보여준다[2].

표 1. CANDU 원전 운영현황

(1999년 현재)

발전소명	호기명	Utility 명	보유국	용량(MW)	가동시점	가동년수	현재상태	
Pickering A	Unit 1	Ontario Hydro	Canada	515	1971	29	무정지	
	Unit 2			515	1971	29	정지	
	Unit 3			515	1972	28	정지	
	Unit 4			515	1973	27	정지	
Bruce A	Unit 1	Ontario Hydro		759	1977	23	정지	
	Unit 2			769	1977	21	정지	
	Unit 3			759	1978	22	정지	
	Unit 4			769	1979	23	정지	
Point Lepreau		New Brunswick Power (NBP)		630	1983	17	운전중	
Gentilly-2		Hydro Quebec		638	1983	17	운전중	
Wolsong 1		KEPCO	Korea	638	1983	17	운전중	
Embalse		-	Argentina	600	1984	18	운전중	
Pickering B	Unit 5	Ontario Hydro	Canada	516	1983	17	운전중	
	Unit 6			516	1984	16		
	Unit 7			516	1984	16		
	Unit 8			516	1986	14		
Bruce A	Unit 5			Ontario Hydro	835	1985	15	운전중
	Unit 6				837	1984	16	
	Unit 7				837	1984	16	
	Unit 8				837	1987	13	
Darlington	Unit 1	Ontario Hydro	Canada	881	1990	10	운전중	
	Unit 2			881	1989	11		
	Unit 3			881	1991	9		
	Unit 4			881	1992	8		
Cernavoda 1-3		-	Romania	665 x 3	1996/2003*	-	-	
Wolsong 2 & 3		KEPCO	Korea	668 x 2	1997/1998	3/4	운전중	
Wolsong 4		KEPCO	Korea	668 x 1	1999	-	건설중	
Qinshan Phase 3		-	China	700 x 2	2003	-	건설중	

* Forecast date for Unit #3

표 1에서 볼 수 있듯이 많은 CANDU형 원전이 수명중반에 이르고 있으며, Pickering과 Bruce 원전 8개 호기가 Refurbish를 위한 운전정지 상태이다. 이에 따라, 캐나다에서는 발전사업자와 AECL이 공동으로 CANDU형 원전에 대한 지원, 일반 프로그램의 계획 및 작성을 위한 토론, 정보교환 및 연구개발(R&D), 공동 프로젝트 수행 등을 목표로 CANDU형 원전 소유자그룹(COG : CANDU Owners Group)을 결성하여 발전소 안전운전을 위한 주요기기의 수명평가, 보수, 개선 및 가동중 검사 프로그램 등의 원전수명관리 관련 연구를 수행하고 있다. 이의 일환으로 Pickering A의 1, 2, 3, 4호기와 Bruce 1, 2호기는 연장운전을 위한 압력튜브 전면 교체작업을 수행한 바 있으나 발전소 운영과 주요 기기의 안전성 문제로 인하여 운전을 정지하고 있는 상태이다. 현재 운전정지 중인 Pickering 원전은 2001년 재가동할 예정이고 Bruce 원전은 2003년부터 2008년까지 상업운전을 재개할 예정으로 있다.

한편, 1990년부터 규제기관인 AECB에서는 가동연수가 오래된 원전의 지속적인 안전운전을 위한 규제기준을 준비하고 있으며, AECL에서는 1995년부터 New Brunswick Power (Point Lepreau NPP) 및 Hydro Quebec(Gentilly-2 NPP)의 발전사업자와 함께 600MW급인 CANDU-6 설계에서 나타나는 일반 노화문제를 연구하고 있다. 이를 통해 CANDU-6 설계에 대한 30년의 설계수명을 최소 50년 이상으로 연장하기 위한 기술적, 규제측면의 검토를 수행하고 있다. 이와 더불어 900MW 급인 CANDU-9 설계에 대해서는 60년까지 설계수명을 연장하기 위한 평가를 수행하고 있으며, CANDU 원전수명관리 프로젝트는 AECL과 발전사업자가 수행하고, COG가 R&D 분야를 지원하는 형태로 운영되고 있다.

3. CANDU 원전수명관리 현황

3.1 단계별 수행내용

캐나다에서 수행하고 있는 CANDU 원전수명관리 연구의 1차 목표는 원전 설계수명 동안 신뢰성과 안전성을 유지하고 지속적인 이용률(Capacity Factor) 유지를 통해 발전소를 경제적으로 운전하는 것이며, 2차적인 목표는 설계수명을 최소 50년까지 연장하는 것이다. 캐나다에서 진행중인 CANDU 원전수명관리 연구는 크게 3단계, 즉 1단계 범주연구(Scoping Study), 2단계 상세평가 연구 그리고 3단계 수리/보수 및 교체 연구로 나눌 수 있지만 명확한 구분없이 진행되고 있다. 그림 1은 캐나다에서 수행하고 있는 CANDU 원전수명관리 추진일정을 나타낸 것이며, 그림 2는 AECL의 원전수명관리 관련 Engineering 측면의 추진체계를 나타낸 것이다[2]. 다음은 1단계 및 2단계 CANDU 원전수명관리 연구동향을 요약한 것이다.

1단계 CANDU 원전수명관리

CANDU 원전수명관리 1단계에서는 주요 계통, 구조물 및 기기선정과 이들에 대한 노화손상관련 연구를 수행하고 있으며, 연장운전과 관련하여 설계변경 규제 및 안전성 검토, 기술개

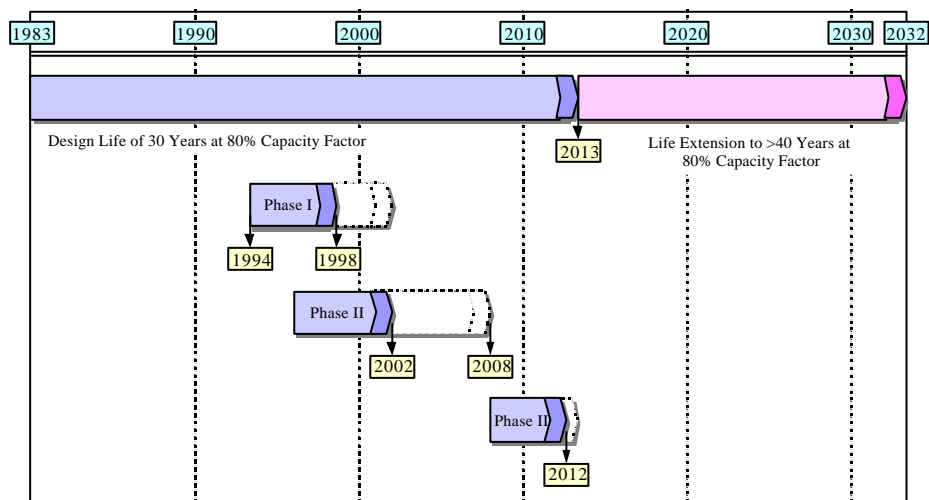


그림 1. CANDU 원전수명관리연구 장기계획

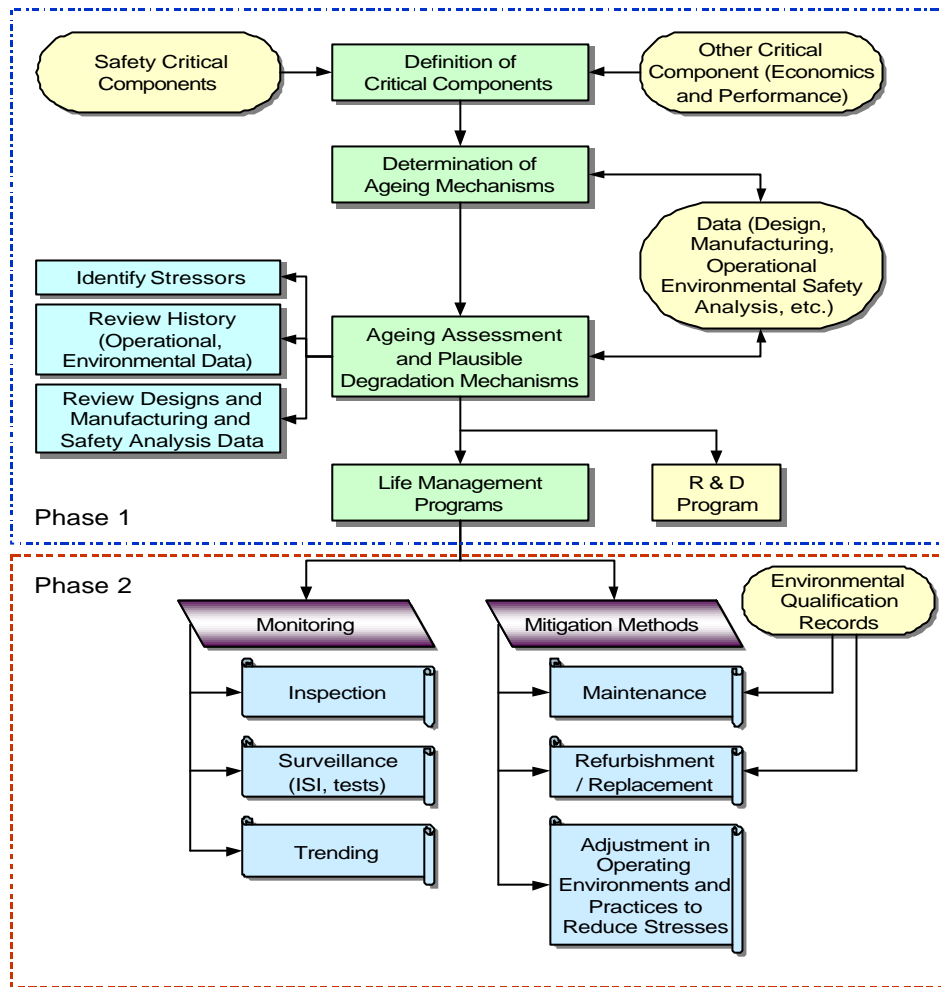


그림 2. AECL의 원전수명관리 연구 추진체계

발 지원, 자체 신기술 개발, 2단계 수명관리연구 계획 작성 등을 주 내용으로 하고 있다. AECL이 원전수명관리 연구 대상으로 선정한 원전은 가동년수가 17년에 도달하고 있는 New Brunswick의 Point Lepreau와 Hydro Quebec의 Gentilly-2 원전이며, 국내 원전수명관리 연구 방식과 달리 각 단계별 연구의 명확한 구분이 없이 연구가 완료된 분야는 계속해서 다음 단계로 진행하고 있다. 따라서 1단계 연구가 종료되지 않은 상태에서 2단계 원전수명관리 연구를 이미 1997년에 착수한 상태이다[3]. 표 2는 AECL이 원전수명관리 연구 대상으로 선정한 주요 계통, 구조물 및 기기와 1999년 현재 진행되고 있는 연구현황을 보여준다.

AECL의 1단계 원전수명관리 연구 수행결과, CANDU-6 설계수명 종료시점 전인 25~30년 사이에 원전 안전 및 신뢰성 확보를 위하여 중간보수(Midlife Rehabilitation)가 필요한 것으로 확인되었으며, Gentilly-2와 Point Lepreau는 원전 중간보수의 일환으로 2003~2009년 사이에 전면적인 압력튜브 교체를 수행해야 할 필요성이 있는 것으로 잠정결론이 난 상태이다. 다음은 1단계 CANDU 원전수명관리의 최종 보고서에 포함될 주요 내용을 요약한 것이다.

- 임계 계통, 구조물 및 기기 확인 및 결정
- 기기 제작, 설치 및 보수자료 검토
- 설계기준/설계조건 및 운전환경 검토
- 운전환경에서의 손상기구 검토
- 기기수명 및 연장운전 가능성 평가
- 향후(30 & 50년) 손상기구에 대한 권고사항 도출

표 2. AECL 원전수명관리 연구 진행 현황

번호	기기명	현재 진행상태
1	Fuel Channel	수행중
2	Reactor Structure	연구종료(최종 보고서 발간)
3	Containment Structure	연구종료(최종 보고서 발간)
4	HTS Piping (Feeders Excluded)	1999년 완료예정(AECL 자체평가)
5	Cable Systems & Motors	1999년 완료예정(AECL 자체평가)
6	Instrument & Controls Components	1999년 이후 제안
7	Conventional Piping	1999년 완료예정(AECL 자체평가)
8	Large Pressure Vessels	1999년 이후 제안
9	High Pressure & Capacity Pumps	-
10	Steam Generators	AECL 자체평가 완료(Utilities 제안)
11	Airlocks	-
12	TBN Generators	-
13	Reactor Building Internal Load-Bearing Structures	-

2단계 CANDU 원전수명관리

2단계 CANDU 원전수명관리 연구에서는 초기에 수립한 수행계획과 공정을 재검토함과 동시에 CANDU-6 핵심 기기들에 대한 상세검사 및 잔여수명 정밀평가를 수행하며, 발전소 운전상태 감시/감독, 규제기관 제출자료 작성 및 지속적인 신기술 개발을 주 내용으로 하고 있다. 이외에도 1단계 연구 수행 중에 해결해야 할 분야로 도출된 압력튜브 전면 교체 타당성, 운전중 누적된 감속재의 트리튬 제거방안, 컴퓨터를 이용한 CANDU형 산업 데이터베이스 개발, 효율적인 검사 및 보수 프로그램 검토 등을 수행할 예정이다. 다음은 1단계 원전수명관리 연구에서 현재까지 도출된 간단한 결과와 2단계 연구에서 수행 예정인 주요 내용을 간략히 소개한다[4].

- 열수송계통 : 원전수명관리 관점에서 중요하게 고려되는 열수송계통의 주요기기들 중 핵연료 집합체와 증기발생기를 제외하고 열수송펌프/모터, 자관(Feeder), 대구경 배관 등에 대하여 중성자 조사취화, 피로, 침부식, 프레팅 마모, 크리이프 등의 손상기구 관점에서 설계여유를 평가하였다. 재료가 중성자 및 감마선에 지속적으로 노출될 경우 크리이프, 취화 등의 손상이 발생하여 재료의 강도나 인성이 변하지만 핵연료 집합체를 제외하고 중성자 조사취화에 심하게 영향받는 열수송계통의 기기는 없다. 피로는 배관이나 기기가 많은 정상 및 비정상 운전조건이 반복될 경우에 발생한다. 열수송계통 주요기기의 피로평가를 수행하기 위하여 Point Lepreau를 대상으로 과거 10년간 운전하는 동안에 실제 발생한 과도상태 횡수와 60년 연장 운전시 발생가능한 과도상태 횡수를 설계 과도상태 횡수와 비교하여 60년 동안 연장 운전할 경우에도 실제 과도상태 횡수가 설계 과도상태 횡수에 도달하기까지는 여유가 있는 것으로 확인되었다. 침부식은 SA106 Gr.B 탄소강으로 제작된 출구자관에서 2상흐름, 고속유체, 핵연료 관 입출구 사이의 심한 온도차 등으로 인하여 가장 심하게 영향을 받는 것으로 확인되었으며, 자관의 두께는 보통 6~7mm로서 정상 운전온도에서 압력에 필요한 두께의 6배이고 적용 설계코드에 필요한 두께의 2배를 적용하고 있다. 또한 침부식으로 인한 벽두께 감소현상을 억제하기 위하여 설계당시 출구자관과 Feeder Hub의 최소 크롬함량을 0.2wt%로 규정하고 있다. 그러나 최근에 원자로 냉각재 공급자관 두께감소 문제가 강도 높게 제기되고 있으므로 COG와 협력하여 문제해결을 위한 연구개발을 추진할 계획이며, 침부식 감시시스템을 설치하여 벽두께가 허용치 이하로 떨어질 경우에는 핵연료 교체를 위한 운전정지 기간 동안에 교체할 예정이다. 진동, 크리이프 및 열팽창 관련 손상의 경우, 인접한 자관과 접촉하고 있는 자관 및 다른 기기의 프레팅으로 인한 벽두께 감소현상이 발생 가능하지만 현재까지 기준치를 넘어선 예는 없었으며,

손상방지 및 손상 가능성의 최소화를 위해 자관을 제거하여 측정하는 방식을 채택하고 있다. 이외에도 마모와 응력이완 등의 손상이 예상되지만 동적기기인 열수송펌프 및 밸브는 원자로 정지시 쉽게 수리 및 보수할 수 있으며, 용접이나 롤링 접합부의 응력이완은 원전운전 초기 3~4년 동안에 주로 발생하는 것으로 확인되었다.

- 증기발생기 : CANDU-6 원전인 Point Lepreau와 Gentilly-2 증기발생기의 설계수명은 30년이고 튜브 재료는 Incoloy-800으로서 이는 Inconel-600 튜브보다 우수한 것으로 확인되고 있지만 30년 이상 운전 가능성을 예측하는데는 많은 어려움이 있다. 그러므로 효과적인 증기발생기 노화관리 프로그램을 위해서는 체계적이고 설득력있는 접근 방식이 필요하다. 따라서 증기발생기에서 발생한 문제점에 관해서는 압력튜브 교체기간 동안 혹은 이전에 어떤 조치를 취해야 하는지 결정해야 한다. 이를 결정하기 위하여 손상 민감도와 증기발생기 상태를 진단하고 기술 및 경제성을 평가한 후 압력튜브 교체 전에 권고된 검사를 수행할 예정이다.
- 격납용기 : 격납용기 계통에서 원전수명관리에 중요하게 고려되어야 하는 구조물 및 기기는 격납용기 외에 라이너, 관통구조물, 다우징(Dousing)계통, 격납건물 격리계통 등이다. 그리고 노화관리를 위해 고려하고 향후 수행예정인 항목은 비상급수 탱크와 격납용기 냉각을 위한 순환수의 화학물질 관리분야, 밸브 개폐속도 및 빈도분야, 전력 관련계통의 환경분야 및 금속피로 등이다.
- 케이블 : CANDU 원전에서 사용되고 있는 각종 케이블 중에서 특히 주의를 요하는 케이블은 전력 및 제어 케이블이다. CANDU-6 원전 안전관련 계통의 제어 케이블과 계장 케이블은 폴리염화비닐로 제작되었으므로 3단계 원전수명관리 연구 수행시 실제 많은 테스트를 수행할 예정이다. 그리고 CANDU-6 전력 케이블은 가교결합 폴리에틸렌(XLPE ; Cross Linked Poly Etylene)으로 피복되어 있다. 1단계 연구에서는 전력 및 계장 케이블에 사용된 케이블 유형 및 제작 특수성 검토, 테스트 데이터 검토 및 케이블 상태감시 기술의 타당성 및 신뢰도 검토를 수행하였으며, 2단계에서는 모든 CANDU-6의 케이블 손상평가를 수행할 예정이다.
- 핵연료관 교체 타당성 : 1단계 연구결과 Point Lepreau와 Gentilly-2의 압력튜브는 2003~2009년 사이에 전면적인 교체를 수행할 것으로 잠정결론이 난 상태이다. 압력튜브 대량교체에 소요되는 비용과 시간은 중간보수 단계의 경제성 관점에 중요한 요소로서 발전 사업자가 자체 발전소에 대하여 경제성 평가를 수행하고 자체 판단하여 연장운전 여부를 결정한다. 압력튜브 전면교체 관점에서 경제성 평가에 고려되는 사항은 한 번에 교체해야 할 압력튜브수, 컬란드리어튜브의 교체 필요성, 튜브교체를 위한 광범위한 사전계획 수립, 소요설비의 사전설계 및 설치(Lifting Points, Upgraded Cranes, Fuelling Machine Bridge Ball Screws 교체 등), 핵연료관 이송장치 재설계 여부 검토 등으로서 2단계 연구동안에 수행할 예정이다.

이외에 감속재의 트리튬 제거, 효율적인 원전관리 방안 등의 연구도 원전수명관리 연구의 일환으로 수행하고 있다. 원전 주요기기의 문제점을 조기에 파악하고 사전에 계획되지 않았던 보수 및 정비를 최소화하여 원전 이용률을 높이기 위해서는 규칙적인 유지보수나 정기적인 검사를 수행해야 한다. 이와 같은 사전정비에는 계획, 절차, 정비 세부항목, 설계특성 검토 등이 포함되어야 하며, 이는 어떤 계통 및 기기의 수명을 유지하거나 연장하는데 중요한 역할을 한다. 그림 3은 OM&A (Operations, Maintenance, and Administration) 비용과 원전 이용률 인자 사이의 상관관계로서 원전이 노화함에 따라 원전관리를 위한 비용을 증가하여 상쇄하지 않을 경우 이용률 인자는 떨어진다는 사실을 보여준다. 그리고 그림 4는 유지보수 프로그램 비용에 대한 사전 및 사후정비의 효과를 보여준다. 여기서 알 수 있는 사실은 발전사업자가 자체 정비 프로그램을 수행함으로써 전체 소요되는 비용을 회복시킬 수 있음을 나타내며, 또한 사전 및 사후정비 사이의 최적균형 형상을 나타낸다.

3.2 규제측면

최근 캐나다를 포함한 세계 각국의 원자력 발전소 규제관련 관심은 신규 원전의 인허가에서 원전 주요 계통, 구조물 및 기기의 노화에 대한 연속적인 안전운전 입증으로 전환되고 있다. 캐나다 원자력 발전소 규제기관인 AECB(Atomic Energy Control Board)는 1980년대

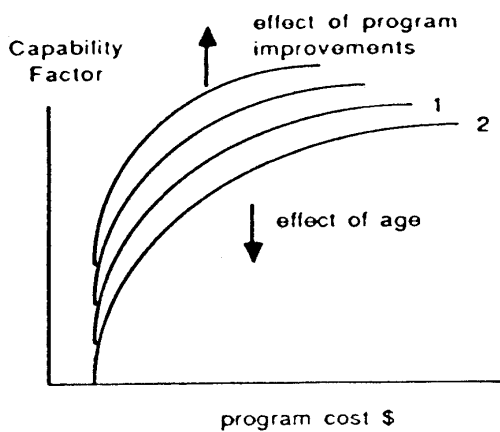


그림 3. O&M&A 비용과 이용률 인자의 상관관계

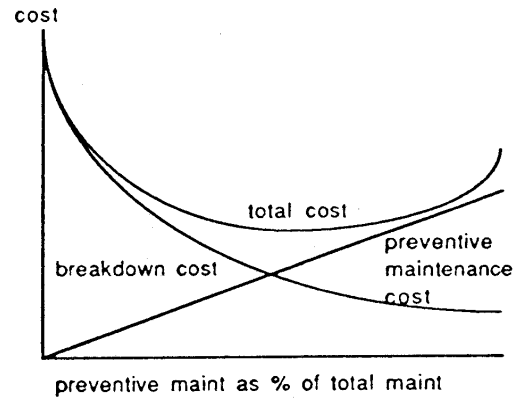


그림 4. 유지보수 프로그램 비용에 대한 사전 및 사후정비의 효과

중반 이후부터 CANDU 원전의 운전과 유지보수의 규제기준 개발에 주목하여 왔으며, 최근에는 원전 현장시찰 및 세부 계통검사를 포함한 조직적인 검사 프로그램을 일관되게 수행하고 있다[5]. 그림 5는 캐나다의 인허가 갱신을 위한 체계적인 절차를 보여준다. 인허가 갱신 업무의 모든 책임은 발전소 임원에게 있으며, 인허가 갱신 신청서에는 발전소 안전성능, 안전성능 개선을 위한 프로그램, 지적된 프로그램의 진행상태, 주요 안전문제 등이 포함되어야 한다. 이의 일환으로 AECB는 Bruce A에서 제출한 발전소 유지보수 기준이 장기간 원전의 안전운전을 입증할 수 없는 것으로 판단하여 2년에 한번씩 실시하던 인허가 갱신 기간을 1년에 한번으로 줄였으며, 1990년에는 각 원자력 발전소에 운전년수 증가에 따른 안전운전 보증서를 제출하도록 지시한 바 있다[2].

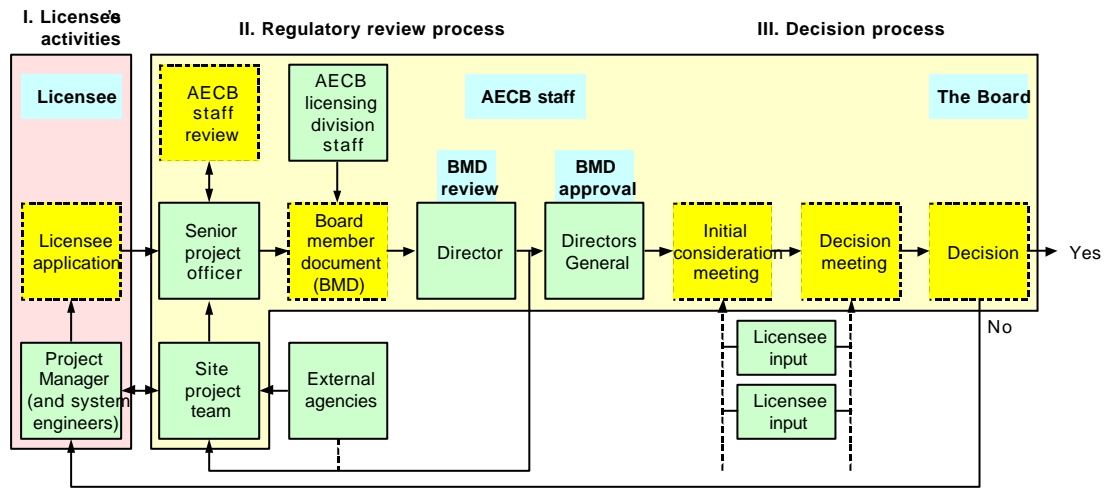


그림 5. 인허가 갱신을 위한 체계적인 절차

한편, AECB는 1991년 초기에 노화관리 요건에 대한 규제기준 관련 권고사항을 마련하기 위해 내부 그룹을 구성하여 1992년 3월에 문서초안을 작성하였다. 문서초안에는 CANDU 원전 노화관리 프로그램에 대하여 AECB가 계획하고 있는 기본요건, 설계요건 및 운전요건을 포함하고 있다.

3.3 발전 사업자 프로그램

3.4.1 New Brunswick Power

New Brunswick Power가 운영하고 있는 Point Lepreau는 1983년에 상업운전을 시작

하여 현재까지 90% 이상의 원전 이용률을 기록하고 있으며, 현재는 AECL, Hydro Quebec 과 함께 30년의 설계수명을 50년까지 연장운전하기 위한 CANDU 원전수명관리 프로젝트를 수행하고 있다. 또한 New Brunswick Power는 사고를 유발하는 기기의 손상확률이 초기 설계당시의 가정치보다 크지 않음을 입증하고 시험, 신뢰도 분석 등을 통한 특정 안전계통의 이용률 입증 및 지속적인 평가, 분석, 감시를 통한 안전계통의 효율성 입증 등과 같은 발전소 노화관련 문제 해결을 위한 자체 프로그램을 수행하고 있다.

New Brunswick Power에서 자체 수행한 CANDU 원전수명관리 연구의 대상 계통, 구조물 및 기기는 열수송계통, 감속재계통, 핵연료 집합체, 원자로 집합체, 격납용기계통, 핵연료 처리계통 및 계측/제어/전력계통으로서 1단계 연구결과 50년 연장운전이 가능한 것으로 잠정 결론이 난 상태이다.

3.4.2 Hydro Quebec

Hydro Quebec이 운영하고 있는 Gentilly-2 원전 역시 Point Lepreau 및 월성 1호기와 동일한 시기인 1983년에 상업운전을 시작하여 현재 설계수명 중반인 17년째 운전중이다. Hydro Quebec 역시 AECL, New Brunswick Power와 함께 30년의 설계수명을 50년까지 연장운전하기 위한 원전수명관리 공동 프로젝트를 수행하고 있으며, New Brunswick Power와 동일하게 자체 프로그램을 수행하고 있다. Hydro Quebec의 CANDU 원전수명관리 연구의 목적은 1차적으로 설계수명동안 장기 신뢰도, 이용률, 안전성 및 합리적인 발전비용 유지이며, 최종적으로는 30년 설계수명을 50년으로 연장하기 위함이다. 원전 연장운전과 관련하여 자체 경제성 평가 프로그램을 수행한 결과, 신규원전 건설과 비교할 때 상당히 고무적인 것으로 확인되었으며, 기술적 평가결과 역시 New Brunswick Power와 유사하게 나타난 것으로 확인되었다. 그 결과는 설계수명 25년에서 30년 사이에 중간보수가 필요한 것으로 나타났으며, 이때 압력튜브의 전면 교체가 필요한 것으로 확인되었다.

3.4.3 Ontario Power Generation Co.

CANDU 원전 20기를 보유(8기는 정지중)하고 있는 Ontario 발전사(Power Generation Co.)는 연장운전의 경제적 타당성과 최적수명을 결정하기 위하여 1980년대부터 'Primarily Technical Aging Issues' 프로그램을 시작하였다. 1996년에는 Pickering A 원전 4개 호기를 대상으로 Life Cycle Assessment를 수행하여 압력관 전면교체를 실시한 바 있으며, 이후에는 Bruce A 원전 2개 호기에 대해서도 압력관 전면교체를 실시한 바 있다[6]. 그리고 현재는 수명관리연구와 유사한 개념인 LCM(Life Cycle Management)을 AECL과 COG의 기술 지원을 통하여 Ontario 발전사 전체 원전을 대상으로 경제성 평가와 자체 노화관리 프로그램을 실시하고 있다. Ontario 발전사의 평가대상 계통, 구조물 및 기기(SSCs : Systems, Structures, and Components) 선정방법은 안전관련 또는 원전 정지를 유발할 가능성이 있는 SSCs 중에서 교체비용이 50M\$ CA 이상이거나 교체를 위한 소요 기간이 6개월 이상인 SSCs를 선정하였으며, 모든 임계(Critical) 기기를 평가 대상으로 하지는 않았다. SSCs 수명 평가에 포함되는 내용은 대상 SSCs 범위, 가상 노화기구, 검사결과, 손상률, 평가, 적용 프로그램 등이다. 표 3은 Ontario 발전사 LCM의 연혁을 보여준다. 그림 6은 Ontario 발전사의 노화관리 프로그램을 수행하는 통합 플랜트 평가(IPA)절차를 제시한 것으로서 크게 SSCs 분류 및 선정, 노화기구 확인 및 평가, 계통성능 및 통합 노화관리 프로그램 이행계획 수립의 세 단계로 구분할 수 있다.

4. 결론

현재 전세계적으로 CANDU 원전은 총 27기이며, 1999년에 상업운전을 목표로 하고 있는 국내 월성 4호기를 포함하여 5기가 건설중이다. 그리고 초창기 CANDU 원전은 설계수명 종료 시점에 도달하고 있는 실정이다. 이에 따라 캐나다에서는 원전 노화에 따른 안전운전과 30년 설계수명을 50년 이상 연장하기 위해 기기 수명평가, 재생, 개선 프로그램 외에 환경개선 및 주기적인 가동중검사 프로그램 등의 원전수명관리 관련 연구를 수행하고 있다. 그 결과 Gentilly-2와 Point Lepreau의 경우는 압력튜브를 전면 교체하여 향후 50년까지 연장운전이 잠정적으로 결정된 상태이다.

표 3. Ontario 발전사 LCM 연혁

년도	항목	주요내용
1980년대	기술적 노화 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pickering A의 압력관 교체(미확인 손상기구) ○ NPLA(Nuclear Plant Life Assurance) 프로그램 착수 : 고비용 기기의 Life Cycle 특성과 추가 비용소요가 없음을 입증하기 위함
1990년대 초	경제성 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1993년 Bruce 2호기에서 증기발생기와 압력관 교체 필요성이 제기됨에 따라 경제성 평가 수행 ○ Ontario 발전사 원전의 성능저하 시작 ○ Darlington 4개 호기가 가동되고 전력수요 증가율이 낮아짐으로서 발전용량 과잉됨에 따라 Bruce 2호기를 예비비용으로 사용하기 위하여 운전정지 ○ Pickering A&B를 대상으로 경제성평가 수행
1990년대 중반	Life Cycle 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1995년 발전소 수명계획 준비, 가동중 원전을 물시에 정지시킬 수도 있는 주요 문제점(Destiny Issue)들을 각 Site 별로 결정 ○ 1996년 Pickering 4개 원전을 대상으로 SLCA (Station Life Cycle Assessment) 수행 ○ 1996년 Ontario 발전사의 원전성능 저하가 지속됨, Pickering 원전은 Relief Valve Elastomeric Diaphragm 손상 후 계속 정지중이며, Bruce 원전은 Power Pulse 문제로 출력감발 ○ 1996년 후반기 Ontario 발전사 이사회가 Pickering 원전에 자본투자 요청, 전체 원전으로 확대 ○ LCM(Life Cycle Management)은 기존 원전에 대한 투자, 운전수명 극대화 및 40년 이상 연장운전 타당성을 포함한 경제, 기술 및 규제에 통합적 개념임 ○ LCM은 Ontario 발전사의 총괄 노화관리 프로그램의 일부임
1997년 이후	통합 플랜트 평가	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ontario 발전사 전체 원전을 대상으로 통합 플랜트 평가(IPA) 수행 중 ○ 향후 LCM 전략개발

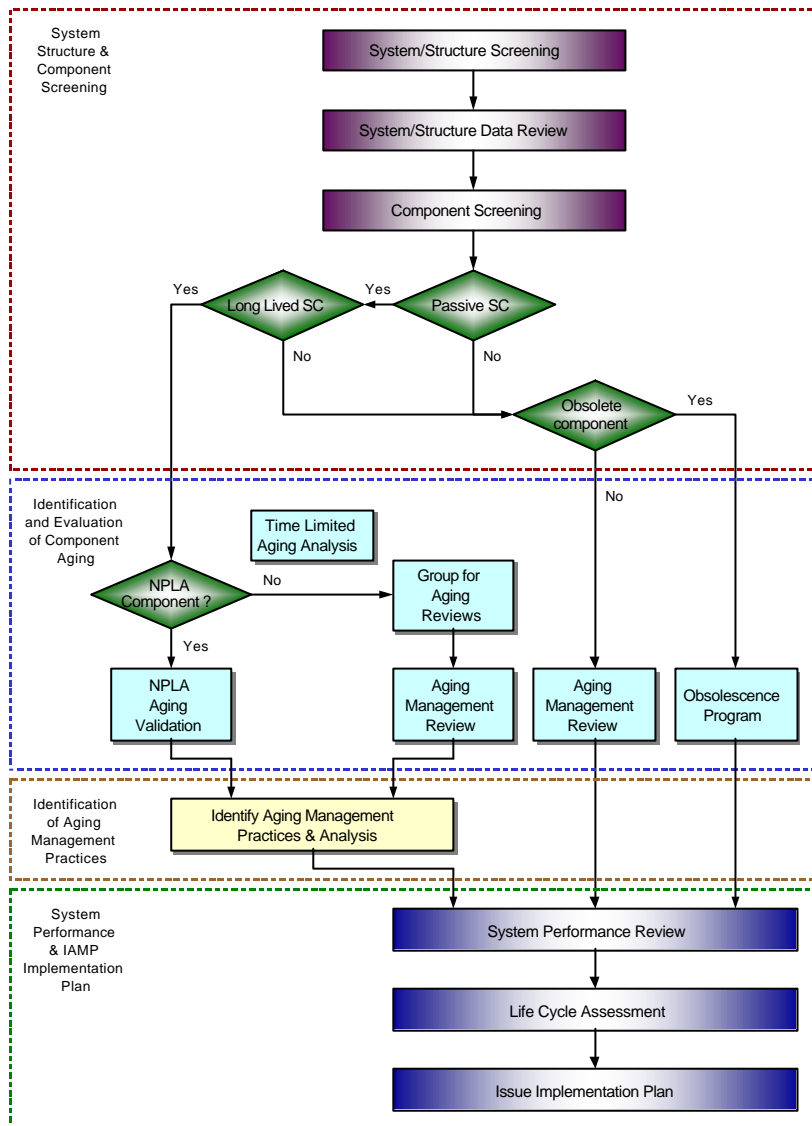
국내에서 운전중인 월성 1호기 역시 Gentilly-2, Point Lepreau와 마찬가지로 1983년에 상업운전을 시작하여 현재 설계수명 17년 시점에 달하고 있다. 국내에서는 이미 가압경수로형 원전인 고리 1호기를 대상으로 설계수명 변경을 위한 타당성 조사 연구를 수행하여 기술적/경제적 측면에서 충분히 가능성이 있는 것으로 입증한 바 있으며, 현재 정밀평가 단계인 2단계 원전수명관리 연구(Ⅱ)를 수행중이다. 고리 1호기는 상업운전 15년 시점에서 연장운전을 위한 타당성 평가연구에 착수하였으나 월성 1호기는 현재 17년째 가동중이므로 설계수명 변경을 위한 타당성 평가가 시급한 실정이다. 가압경수로 원전과 CANDU 원전은 운전조건, 설계 및 기기특성, 운전환경 등에서 많은 차이가 있기 때문에 캐나다에서 수행되고 있는 선형 CANDU 원전수명관리 기술과 국내 가압경수로형 원전을 대상으로 한 수명관리 기술을 바탕으로 국내 CANDU 원전에 대한 종합적이고 체계적인 원전수명관리 연구를 수행해야 할 필요성이 있다. 또한 CANDU 원전수명관리 연구를 최근 국내 규제기관에서 신규 및 노후 원전에 적용하기로 결정된 주기안전평가(PSR) 제도의 요건충족과 연계하여 수행할 필요성도 대두되고 있다.

따라서 본 고에서 검토한 캐나다 CANDU 원전수명관리 연구의 진행상황, 선정된 주요 계통, 구조물 및 기기, 도출된 주요 노화기구와 평가방법, 평가결과, 규제관련 사항 등을 향후 국내 월성 1호기를 대상으로 한 CANDU 원전수명관리 연구 수행시 긴요하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

[후기] 본 고는 캐나다 AECL에서 수행된 “중수로형 수명관리 기술전수” 교육과정 중 수행한 내용의 일부이다.

참고문헌

1. E. J. Dunstan, "Safety Review of Operating Nuclear Power Plants in Canada, IAEA-SM-342/1, AECS.
2. B. A. Shalaby and E. G. Price, "CANDU Plant Life Management and Plant Life Extension", AECL, 1997.
3. 황경모, "중수로형(CANDU) 수명관리 기술전수 해외교육 보고서" KOPEC, 1997.
4. 황경모, 진태은, "CANDU 원전수명관리 현황 및 전망", 전력기술지, 1997.



[주] NPLA : Nuclear Plant Life Assurance
 IAMP : Integrated Aging Management Program

그림 6. Ontario 발전사의 AMP IPA 수행절차

5. J. Edward and Dunstan, "Regulatory Aspects of Nuclear Plant Life Management", AECB, 1996.
6. P. C. Watson, "Ontario Hydro's Nuclear Life Management Activities", Presentation th the 6th Meeting of the NEA Expert Group on NPP Life Management, 1997.