JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Technical paper

16(3) : 271-286 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.3.271

중수로 원자로집합체 해체 표준공정 개발

한 강[1,*], 김미진[1], 임용규[1]

[1]현대엔지니어링(주)

Development of Standard Process for Dismantling the PHWR Reactor Assembly

Kang Han[1,*], Mi-jin Kim[1] and Yong-kyu Lim[1]

[1]Hyundai Engineering Co.,Ltd., Hyundai Bldg. 75, Yulgok-ro, Jongno-gu, Seoul 03058, Republic of Korea

Abstract There is no case of decommissioning the Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR) in the world, and a similar cases related to the decommissioning of the PHWR Reactor assembly are the experiences of replacing the pressure tube (fuel channel assembly) and the calandria tube. In Korea, there is a case of replacing the pressure tube (fuel channel assembly) and the calandria tube for the Wolsong Unit 1. This paper examines the standard work and process for decommissioning of the PHWR Reactor assembly with reference to this case. For the decommissioning of the PHWR Reactor assembly, the standard work and process are prepared based on the description of the structure of the Reactor assembly and the order of dismantling the structure in consideration of the specific structure of the Reactor assembly. In order to standardize the decommissioning standard work and process, it is necessary to set the dismantling area and the work difficulty factor. The unit decommissioning areas are set by including the information such as major SSCs, radiation zone classification and building name for each zone. The work difficulty factors are to consider additional time that is unavoidably caused by the radiation environment and work environment during dismantling work. The work difficulty factors include work accessibility, wearing protective equipments, work permit and approval in the radiation control area, and work break time, etc.

Key words: PHWR decommissioning, PHWR reactor assembly dismantling, Calandria assembly dismantling process

1. 서 론

원전해체란 원전시설을 안전하고 친환경적으로 제거하여 기존 자연 상태로 되돌리기 위한 모든 기술적, 행정적 활동을 의미하여 특히 원자로 해체는 극한 환경 즉 고방사능에서 적용해야 하는 고난이도 기술로, 방사선 안전관리, 기계, 화학, 제어 등 다양한 분야의 지식과 기술이 복합된 종합 엔지니어링 기술이다[1].

'17년 6월 고리1호기 영구정지에 이어 '19년 12월 월성1호기의 영구정지가 결정되었다. 월성1호기는 가압 중수로형(Pressurized Heavy Water Reactor, PHWR) 원전으로 경수로와 별도로 중수로 고유특성을 반영한 해체기술 개발이 필요하다. 이에 따라 한국수력원자력㈜은 중수로 해체기술 개발 추진 중이다[2]. 국내의 경우 상용원전 해체

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author. Kang Han
Tel. +82-2-2134-5704 E-mail. hanriver7@hec.co.kr

Received 4 May 2022 Revised 27 September 2022 Accepted 30 September 2022

경험은 없으나, 소규모 원자력 시설(연구용 원자로, 우라늄 변환시설 등) 해체 경험이 있으며, 중수로의 경우 '11년 월성1호기 원자로 압력관 교체 등 가동원전의 대형기기의 교체 경험 및 기술을 확보하고 있다[3].

본 논문에서는 월성1호기 원자로의 칼란드리아관 및 압력관 교체 경험자료를 기반으로 월성1호기 원자로집합체를 안전하고, 효율적으로 해체하기 위한 해체 표준작업 및 공정과 품셈 산출 시 고려사항을 살펴보고자 한다.

2. 개발 방법

2.1. 월성1호기 압력관 교체 사업 검토

2.1.1. 사업 개요

압력관은 원래 수명연한이 도달하거나 정비가 필요한 경우 부품을 교체할 수 있도록 설계되어 있으며, 이미 그 기술은 입증되어 있다. 그리고 압력관은 개별교체(Single Fuel Channel Replacement, SFCR) 또는 전량교체(Large Scale Fuel Channel Replacement, LSFCR)를 할 수 있다.

월성1호기는 '05년 주기적안전성평가(Periodic Safety Review, PSR) 결과, 압력관의 길이 방향 연신량이 운전제한치에 도달할 것으로 평가되어 발전소의 안전성을 확보하기 위하여 압력관 전량교체를 추진하게 되었다. 월성1호기는 '06년 5월 캐나다 원자력공사(Atomic Energy of Canada Limited, AECL)와 교체공사 계약 체결 후 장비 및 기자재 제작, 인허가 취득 등 약 34개월의 준비기간을 거쳐 '09년 4월 1일 원자로 정지 및 교체작업에 착수하였다. 월성1호기는 총 839일간의 교체작업을 성공적으로 완료하고 '11년 7월 18일 발전재개를 개시하였다[4].

(1) 주계약자
AECL/시공하도급: 한전 KPS
(2) 사업기간
'06.05～'11.07/실 교체기간: '09.04～'11.07
(3) 교체 범위
압력관, 칼란드리아관, 엔드피팅, 냉각재공급자관 및 관련기기 일체
(4) 추진경과
월성1호기 압력관 교체 주요 추진현황은 다음과 같다.
- '06.05: 주공사 계약체결
- '08.12: 압력관 교체 인허가 취득
- '09.04: 발전소 정지 및 교체 착수
- '09.06: 연료제거, 중수 배수 및 건조, 간섭설비 제거
- '10.01: 압력관, 칼란드리아관, 냉각재공급자관 및 관련기기 제거
- '11.03: 재사용품 검사
- '11.03: 압력관, 칼란드리아관, 냉각재공급자관 및 관련기기설치
- '11.07: 연료장전, 성능시험 및 발전재개

2.1.2. 월성1호기 압력관 교체 주요 공정

월성1호기 압력관 교체 주요 공정은 다음과 같다[4].

(1) 준비작업
연료제거, 중수배수 및 건조, 간섭설비 제거, 교체장비용 작업대 설치 등
(2) 제거작업
냉각재공급자관, 엔드피팅 및 관련기기, 압력관, 칼란드리아관 제거
(3) 검사작업
재사용 기기들에 대한 건전성 검사
(4) 설치작업
칼란드리아관, 압력관, 냉각재공급자관 등 신품기기를 설치하는 작업
(5) 연료장전 및 성능시험
연료장전, 수압시험, 교체기기 및 계통 성능시험 등

2.2. 중수로 해체 대상 원자로집합체 구성품

원자로집합체는 경수로 채워지고 탄소강 철판으로 덮여 있는 콘크리트 구조물(칼란드리아 격실) 안의 원통형 구조물이며 칼란드리아 집합체, 연료채널 집합체 및 반응도제어기기로 이루어져 있다. 중수로 원자로집합체의 주요 구성품은 다음과 같다(Fig. 1 참조).

2.2.1. 칼란드리아 집합체(Calandria assembly)

칼란드리아 집합체는 칼란드리아 용기(Calandria vessel), 두 개의 종단차폐체(End shield), 두 개의 종단차폐 지지대(End shield support), 두 개의 매립링(Embedment ring) 및 종단차폐와 격실냉각을 위한 내부 배관(Calandria tube)들로 구성된다.

(1) 칼란드리아 용기(Calandria vessel)
칼란드리아는 수평 원통형이며 계단형 쉘(Stepped

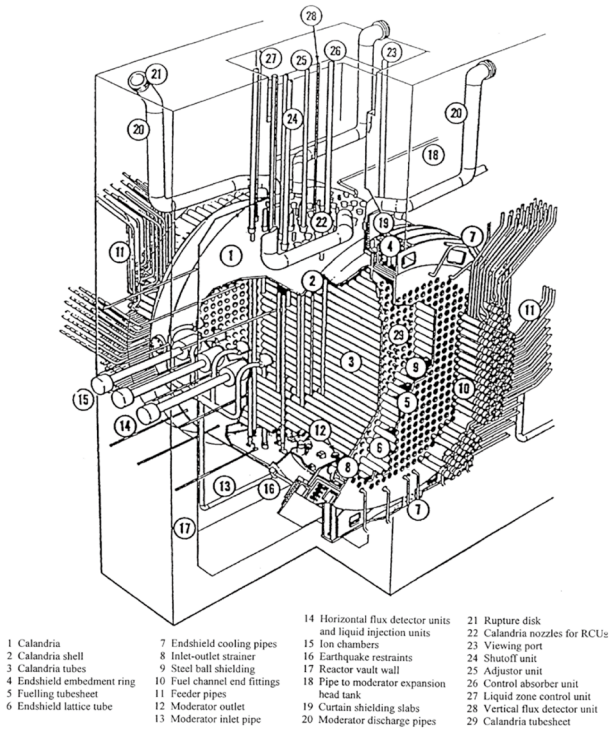

Fig. 1. CANDU6 reactor assembly [5].

shell)로 구성되고, 양 끝은 종단차폐체인 튜브시트에 의해 막히고, 380개의 칼란드리아관(Calandria tube)이 수평으로 걸쳐 있다.

(2) 칼란드리아관(Calandria tube)

총 380개의 칼란드리아관은 정방피치(Square pitch) 원형 격자 배열을 형성하며 수평으로 칼란드리아 동체에 걸쳐 있다. 칼란드리아관은 연료를 장전한 380개의 연료채널 집합체가 칼란드리아를 통과할 수 있도록 통로를 제공한다.

(3) 종단차폐체(End shield)

종단차폐체는 튜브시트에 의해 양쪽 끝이 막혀있는 짧은 원통형 구조물이며 380개의 격자관이 수평으로 걸쳐 있다.

(4) 종단차폐 지지대(End shield support)

두 개의 종단차폐 지지대 집합체는 각각 수평지지 쉘 및 환형 지지판으로 구성되어 있다. 이 구조물은 종단차폐체와 매립링(Embedment rings)을 연결하며 칼란드리아 격실의 경수와 종단차폐 외부 연료교환기실의 공기 사이에 누수방지 역할을 한다.

(5) 매립링(Embedment ring)

두 개의 매립링은 각각 환형링과 원통형 쉘로 구성되며

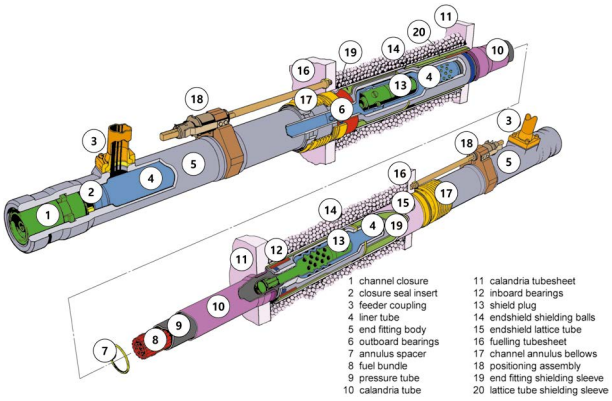

Fig. 2. Fuel channel assembly [6].

원주둘레에 일정간격으로 설치된 보강재 덧붙임 판으로 보강된다. 매립링은 칼란드리아 격실의 끝벽 콘크리트에 매설되고 종단차폐 지지대와 격실을 연결한다.

2.2.2. 연료채널집합체(Fuel channel assembly)

연료채널집합체는 연료를 지지하며 원자로 노내에 위치하고 있다. 연료채널집합체는 냉각재가 누설 없이 유동하도록 하며 또한 차폐기능을 제공한다(Fig. 2 참조).

연료채널집합체(Fuel channel assembly)는 압력관(Pressure tube), 엔드피팅집합체(End fitting assembly), 위치고정기(Positioning assembly), 채널마개집합체(Channel closure assembly), 차폐마개집합체(Shielding plug assembly), 스페이서(Annulus spacer/Garter spring), 공급자관 연결집합체(Feeder coupling assembly), 벨로우즈집합체(Bellows assembly) 등으로 구성된다.

압력관(Pressure tube)은 연료다발을 담고 있으며 원자로 칼란드리아관 안쪽에 위치한다. 압력관과 칼란드리아관 사이의 환형 공간 속에 스페이서가 이 두 관을 분리시킨다. 엔드피팅집합체는 연료관집합체의 양 끝에 설치되어 연료교환기, 자관연결, 원자로 종단차폐 및 환형기체계통 차폐마개와의 연결을 제공한다.

채널마개는 엔드피팅 내부에 체결되며 엔드피팅 밀봉삽입체와 함께 냉각재 압력경계를 형성한다. 차폐마개는 원자로로부터 핵연료 교환실 쪽으로의 방사선을 차폐하고 냉각재의 유로를 형성한다.

2.2.3. 반응도제어기기

중수로반응도제어기기에는 조절봉, 흡수봉, 정지봉, 액체독물질주입 정지기기 및 액체영역제어기기 등이 있다.

2.2.4. 칼란드리아 격실

칼란드리아 격실은 칼란드리아 용기 및 종단차폐체를 지지하는 콘크리트 구조물로서, 내부에는 중성자 및 감마선을 차폐하고 원자로로부터의 열을 냉각시키기 위해 경수로 채워져 있다. 칼란드리아 격실의 상부에는 반응도제어기기의 구동부가 설치되어 있다(Fig. 3 참조).

2.3. 품셈 산출 시 고려사항

2.3.1. 해체구역

해체 계획수립 단계에서 필요한 원전의 방사선구역도 및 설계정보 등을 제공하고 해체비용을 산출하기 위하여 해체구역의 설정이 우선되어야 한다[8]. 단위 해체구역은 대상 원전의 건물별/층별/격실별 특성을 고려하여 단위작업 구역을 설정하고, 구역별 주요 설비, 방사선구역 분류 및 건물명 등의 정보를 포함하여 설정하여야 한다.

(1) 해체구역 설정 필요성

해체구역은 세부 해체공정이 수행되는 구역작업 단위로 해체원전의 고유정보가 반영되어야 한다. 해체구역은 원전의 방사선구역도 및 설계정보(물리적 격실 구분) 등을 바탕으로 해체 계획수립 단계에서 설정하며, 해체비용 산출을 위한 작업 난이도 인자의 적용 기반이 된다.

(2) 해체구역 설정 방안

대상 원전의 건물별/층별/격실별 특성을 고려하여 단위작업이 수행되는 해체구역을 설정한다. 다양한 기기, 설비, 계통, 구조물이 존재하고 방사선구역 구분이 세분화된 건물일수록 다양한 해체구역이 설정된다. 단위 해체구역은 건물에 따라 EL. 방사선구역 분류, 구역별 주요 설비 등의 정보가 포함되어야 한다.

(3) 대상 원전 고유 해체구역도 개발

동일한 해체구역 내에서 수행되는 단위작업에는 모두 동일한 작업 난이도가 적용된다. 이에, 해체구역 구분은 물리적인 격실 단위뿐만 아니라, 해체구역별 유사한 준위의 폐기물 발생이 예상되도록 방사선학적 상태를 고려하고, 격실 내 기기, 설비, 계통, 구조물 해체에 적용되는 작업 난이도 인자 설정을 위해 접근성 및 혼잡도 등의 특성을 반영하여 대상 원전의 고유의 해체구역도를 개발하여야 한다.

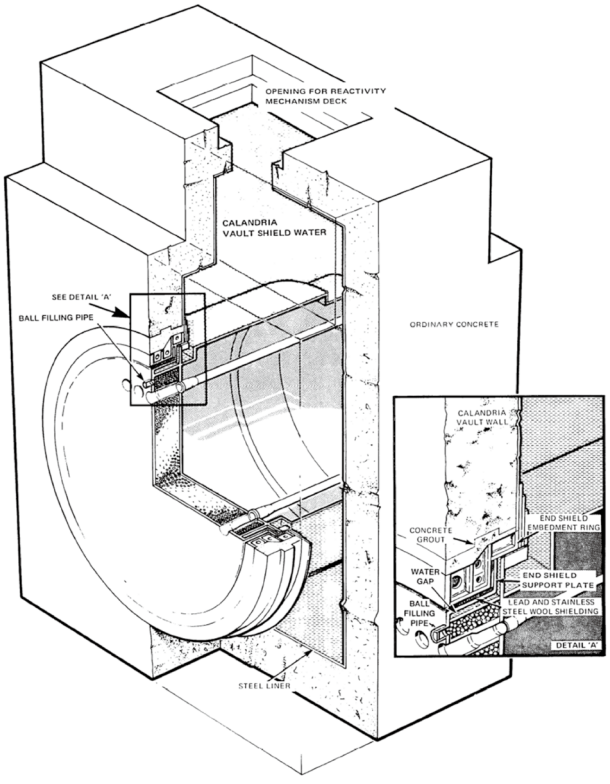

Fig. 3. Calandria vault and shield tank [7].

2.3.2. 작업 난이도 인자

작업 난이도 인자(Work Difficulty Factor, WDF)란 해체작업 시 방사선 환경 및 작업환경 등으로 인해 필연적으로 발생하는 추가 시간에 대한 인자이다. 고공작업, 방호장비 착용, 방사선관리구역 작업 허가 및 승인 취득, 유급휴식시간 등이 고려된다.

대상 원전 특성 및 반복 작업 단위 인자를 고려하여 5가지 유형으로 구분하였다.

(1) 높이 및 접근성: W_{HA}
(2) 호흡 방호: W_{RP}
(3) 방사선 및 ALARA: W_{RA}
(4) 방호복: W_{PC}
(5) 작업휴식: W_{WB}

작업 난이도 인자의 가중치 설정에 영향을 미치는 결정요인과 결정요인을 판단하기 위해 필요한 정보의 출처는 Table 1과 같다.

식 (1)을 이용하여 작업 난이도 인자를 계산한다[9]. 계산 결과는 원전에서 일반적으로 고려되는 실제 작업조건 및 제약사항에 따른 생산성 손실을 나타낸다. 인자의 특성을 고려하여 작업활동 수행에 필요한 소요시간 또는 조정

Table 1. Work difficulty factors adjustment [9]

Category	Controlling variables	Source of variable information
Access factor W_{HA}	• Height of the component above the working floor • Difficulty in working around the component (restricted access)	• Estimators observation or judgment • Plant drawings
Respiratory protection W_{RP}	• Component surface contamination levels (internal or external) • Type of work (potential to create an airborne problem) • General. area surface contamination levels • Site-specific requirements for maintaining respirator qualifications (initial qualification, requalification, etc.) • Personal air sampler requirements	• Radiation work permit requirements • Area survey maps • Site radiation protection program manual
Radiation/ ALARA W_{RA}	• Component contact dose rate • General area dose rate • Site-specific requirements for maintaining radiation worker qualification (initial qualification, requalification, etc.) • Dosimetry requirements	• Area survey maps • Site radiation protection program manual • Radiation work permit requirements
Protective clothing W_{PC}	• Component surface contamination levels (internal or external) • General area surface contamination levels • Type of activity (wet/dry work, potential to create a surface contamination problem) • Site specific work schedule arrangements	• Radiation work permit requirements • Area survey maps • Site radiation protection program manual
Work break W_{WB}	• Site specific work schedule arrangements	• Typical site work schedule

Table 2. WDF applied in foreign NPPs

		Access factor (%)	Respiratory protection factor (%)	Radiation/ALARA factor (%)	Protective clothing factor (%)	Work break factor (%)
AIF/NESP-036 [11]		10~20	10~50	10~40	10~40	8.33
USA	Zion [9]	0~40	0~25	0~40	0~30	8.33
	Monticello [12]	10~20	10~50	10~37	0~30	8.33
	Vermont Yankee [13]	0~30	0~50	0~100	0~50	8.33
	Cristal River-3 [14]	10~20	0~50	0~15	0~30	8.33
	Oconee [15]	10~20	10~50	10~37	10~30	8.33
Canada	Point Lepreau [16]	10~20	10~50	10~37	30	8.33
Sweden	Ringhals [17]	10~20	0~50	0~37	0~30	8.33
	PWR and BWR [18]	10~20	10~50	10~15	15~30	8.33

된 기간에 대해 적용한다.

$$WDF = (1 + W_{HA} + W_{RP} + W_{RA}) \times (1 + W_{PC}) \times (1 + W_{WB}) \quad (1)$$

각 단위 인자에 대한 고려사항은 높이 및 접근성 인자의 경우 비계 사용 여부, 호흡 방호의 경우 호흡기 착용 여부, 방사선 및 ALARA의 경우 출입 시 교육 및 mock up 훈련 등, 방호복의 경우 방호복 및 안전장구 착용 여부, 작업휴식의 경우 근로기준법에 따른 휴식시간이다. 해외 해체원전에 적용된 작업 난이도 인자 가중치 사례를 Table 2에 정리하였다. 식 (1)에 Table 2의 각 인자의 가중치를 적용하여 해체구역에 대한 작업 난이도 가중치를 계산하고, 작업 난이도 가중치에 단위작업 소요시간을 식 (2)와 같이 곱하여 단위작업 실 소요시간을 계산한다.

$$t_{real} = t_{task} \times \mathrm{WDF} \quad (2)$$

Table 3. WDF applied in Wolsong Unit 1 (example)

L1	L2	L3	Details of work	Input manpower and working time		WDF = (1 + W_{HA} + W_{RP} + W_{RA}) × (1 + W_{PC}) × (1 + W_{WB})						Weighted working time (Day)
				Man power	MD	W_{HA}	W_{RP}	W_{RA}	W_{PC}	W_{WB}	WDF	
						0.1~0.2	0.1~0.5	0.1~0.37	0.3	0.08		
1. Dismantling the PHWR reactor assembly												
	1.2 Removal of reactor internals and cutting of connecting piping											
		1.2-1 Removal of horizontally installed internals and related piping in the reactor										
		L1.2-1.1	Cutting of moderator inlet and outlet pipe	7	2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.08	2.07	4.14
		L1.2-1.2	Removal of the ion chamber and housing	8	2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.08	2.07	4.14
		L1.2-1.3	Removal of the horizontal neutron flux meter	8	2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.08	2.07	4.14
		L1.2-1.4	Cutting of poison injection system pipe	8	2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.08	2.07	4.14

t_{real}: Real work duration

t_{task}: Duration per task

2.3.3. 작업 난이도 인자 설정

월성1호기에 적용되는 작업 난이도 인자는 해외 해체원전에 적용된 작업 난이도 인자 중 중수로 원전인 캐나다 Point Lepreau 발전소의 적용사례를 우선 참조하나, 이 작업 난이도 인자는 조정할 수 있는 입력변수이며, 표준품셈의 각 공정에서 적용할 난이도는 작업 환경 여건을 고려해서 적절하게 입력 값을 설정해야 한다. 작업 난이도 인자로 인해 각 단위 작업의 소요시간이 증가된다. 월성1호기 원자로집합체 해체작업에 적용되는 작업 난이도 인자와 이로 인해 증가되는 단위 작업 소요시간의 예시는 Table 3과 같다.

2.3.4. 투입인력 및 인건비

산업통산자원부고시 제2021-137호, 엔지니어링사업대가의 기준에 따라 사업대가 방식에는 실비정액가산방식과 공사비요율에 의한 방식이 있다.

실비정액가산방식이란 직접인건비, 직접경비, 제경비, 기술료와 부가가치세를 합산하여 대가를 산출하는 방식이다. 공사비요율에 의한 방식이란 공사비에 일정요율을 곱하여 산출한 금액에 추가업무비용과 부가가치세를 합산하여 대가를 산출하는 방식이다[10].

대가 산출의 원칙은 관련 분야의 표준품셈이 있을 경우 표준품셈과 연계하여 실비정액가산방식을 적용하는 것이다. 다만, 건설부분, 정보통신분야, 소방시설비분야의 엔지니어링 사업의 대가 산출은 공사비요율 방식을 예외적으로 적용할 수 있으며, 전력시설물의 설계 및 감리, 농어촌정비산업의 측량·설계 및 공사감리의 위탁, 소프트웨어개발용역, 측량용역 등 다른 법령에서 그 대가기준을 규정하고 있는 경우에는 당해 법령이 정하는 기준을 따른다(Fig. 4 참조).

이에, 원전해체 표준품셈 산출에 적용할 투입인력 및 사업대가 기준은 엔지니어링 기술자의 기술등급에 해당되는 경우 실비정액가산방식을 적용하고, 건설업 임금에 해당되는 인력은 공사비요율 방식을 적용한다.

2022년 기준 엔지니어링 기술자의 기술등급에 해당되는 직접인건비, 제경비, 기술료 및 직접경비는 Table 4와 같다. 엔지니어링기술부문 노임단가는 월 평균일수인 22일을 기준으로 1일 8시간의 단가이다.

대한건설협회에서 발행한 2022년 상반기 적용 건설업

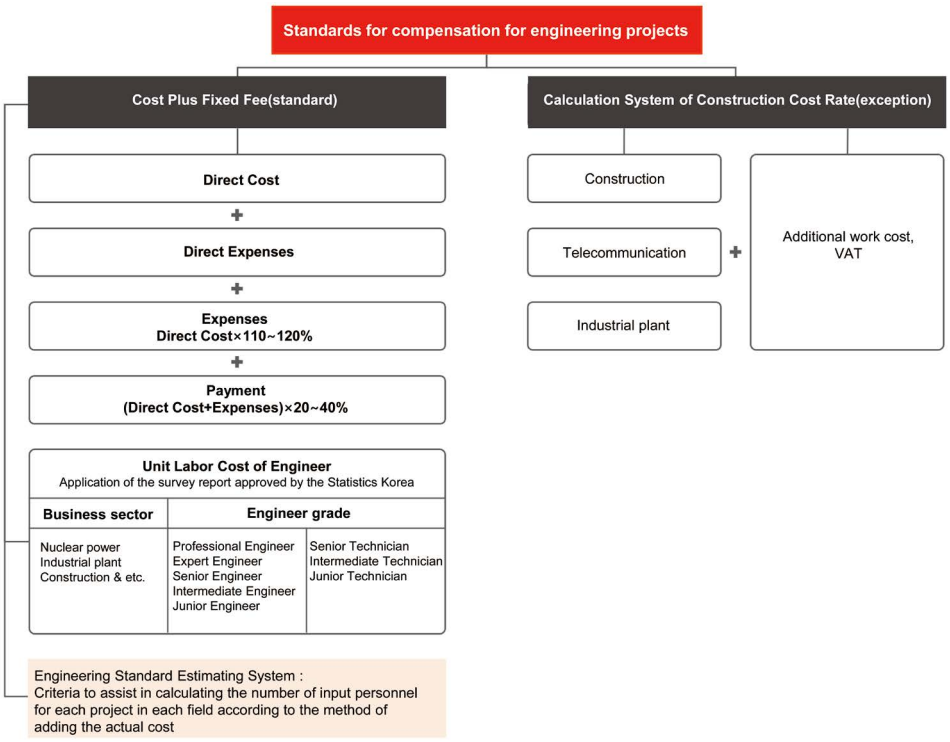

Fig. 4. Standards for compensation for engineering projects [19].

Table 4. Unit labor cost of engineer (Nuclear sector)

	Direct cost	Expenses[1)]	Payment[2)]	Direct expense[3)]	Total
Professional engineer	482,622	555,015	259,409	48,262	1,345,309
Expert engineer	420,219	483,252	225,868	42,022	1,171,360
Senior engineer	325,702	374,557	175,065	32,570	907,894
Intermediate engineer	294,250	338,388	158,159	29,425	820,222
Junior engineer	238,441	274,207	128,162	23,844	664,654
Senior technician	293,964	338,059	158,006	29,396	819,425
Intermediate technician	273,315	314,312	146,907	27,332	761,866
Junior technician	174,680	200,882	93,891	17,468	486,921

[1)]Direct cost × 110~120%, 110% of Direct cost apply
[2)](Direct cost + Expenses) × 20~40%, 25% applied
[3)]10% of Direct cost apply

임금실태 조사 보고서(시중노임단가)에 따른 개별 직종 노임단가는 Table 5와 같다. 개별 직종 노임단가는 연 2회 발행되며, 이에 따라, 직종별 인건비가 변경되므로 해체 표준품셈 산출 시, 인건비 변경 사항이 반영되어야 한다.

2.3.5. 기타 고려사항

(1) 물가상승률

산업통상자원부고시 제2022-11호 "방사성폐기물 관리 비용 및 사용후연료관리부담금 등의 산정기준에 관한 규정" 제13조(물가상승률 및 할인율)에 따르면 원자력 발전소 해체비용 충당금 산정기준의 물가상승률 및 할인율은 Table 6과 같다. 이에 따라, 해체기간에 따라 적용되는 물가상승률은 Table 6을 참고하여 설정한다.

(2) 공구손료 및 잡재료 등

표준품셈에 명시되어 있는 공구손료, 잡재료에 대해서는 이를 계상하여야 한다. 표준품셈에 명시되어 있지

Table 5. Unit Labor Cost of individual occupation

No.	Occupation	Unit labor cost	Remark
1006	Scaffolding worker	262,297	
1056	Plant pipefitter	289,075	Integrated with nuclear pipefitter
1061	Plant craftman	187,735	Integrated with nuclear craftman
1062	Plant cable worker	296,879	Integrated with nuclear cable worker
1063	Electrical and instrumentation worker	208,010	Integrated with nuclear electrical and instrumentation worker
1064	Plant duct worker	183,708	Integrated with nuclear duct worker
1065	Plant insulation worker	236,000	Integrated with nuclear insulation worker
4001	Nuclear plant worker	221,666	
4002	Nuclear welder	194,568	
4003	Nuclear equipment installer	223,770	
4004	Nuclear quality assurance	282,525	
5001	Communication worker	275,633	

Table 6. Inflation rate related to decommissioning costs

	Contents	Remark
Management cost of low and medium level radioactive waste	15.11 million won/ 200 L drum	Notice 2022-11 Article 4
Inflation rate	1.41%	Notice 2022-11 Article 13

않은 공구손료, 잡재료, 경장비손료 등을 계상하고자 할 때에는 별도 계상하되 산정 근거를 명시하여야 한다.

공구손료는 일반공구 및 시험용 계측기구류의 손료로서 공사 중 상시 일반적으로 사용하는 것을 말하며 직접노무비(노임할증과 작업시간 증가에 의하지 않은 품할증 제외)의 3%까지 계상하며 특수공구(철골공사, 석공사, 설비공사 등) 및 검사용 특수 계측기류의 손료는 별도 계상한다. 잡재료 및 소모재료는 설계내역에 표시하여 계상하되 주재료비의 2~5%까지 계상한다. 경장비손료는 일반공구류를 제외한 특수공구와 검사용 특수계측 기구 등의 손료를 말하며 직접노무비(노임할증제외)의 1.5%를 계상한다[20].

이에, 원전 해체 품셈 산출 시 사용되는 장비의 경우, 해체에 필요한 특수장비를 제외한 일반산업 공구 및 장비는 별도로 품셈을 작성하지 않고 직접노무비의 3%에 해당하는 공구손료를 적용한다.

(3) 방사선 관리 및 방호용품 비용

원전 해체 기간 중 방사선 관리 역무는 전체 해체 공사 또는 단위 해체 공사별로 별도 용역계약이 필요한 사항이다. 이에 방사선 관리 역무와 관련된 품셈(보건물리원 및 각종 방호용품) 산출은 별도로 계상하여 추가해야 한다.

(4) 개발이 필요한 장비 가격

안전하고 효율적인 원자로 해체를 위해서 각종 장비가 개발되어야 하며 관련 장비는 해체사업주인 한국수력원자력(주) 주관으로 개발이 되어야 한다. 이러한 장비 개발 및 시제품 제작 등에 대한 비용은 원전 해체 품셈 산출 시, 별도로 계상해서 추가해야 한다.

3. 중수로 원자로집합체 해체 표준공정 개발

3.1. 원자로 해체 공정 가정 조건

해체 공정은 월성1호기 원자로의 칼란드리아관 및 압력관 교체 경험을 반영하였다. 칼란드리아 집합체 해체 공정의 범위는 칼란드리아 용기, 칼란드리아관, 압력관, 압력관/칼란드리아관과 연결된 부속 배관 및 원자로 내장품을 포함한다.

현재 국내·외적으로 실제 중수로 원자로 해체 경험이 없으므로 본 논문에서 개발한 해체 공정은 추가 연구 개발을 통해 보다 효율적으로 개선된 공정을 반영하여 수정, 보완할 수 있다.

본 논문에서 개발한 중수로 원자로집합체 해체 표준공정은 Table 7과 같다.

Table 7. Standard process for dismantling the PHWR reactor assembly

L1	L2	L3	Details of work
1. Dismantling the PHWR reactor assembly			
	1.1 Dismantling preparation		
		1.1.1 Inspection of working area	
		1.1.2 Installation and inspection of the protective cover for reactivity control device	
		1.1.3 Installation of the fuelling machine bridge top working table	
		1.1.4 Installation of the ventilation system for radiation control	
		1.1.5 Installation of the vacuum suction ventilation system	
		1.1.6 Confirmation of changes in fuelling machine bridge control system and final inspection	
		1.1.7 Installation of the dismantling work control room	
		1.1.8 Installation and test of the video surveillance equipment	
		1.1.9 Installation and test of the voice communication equipment	
		1.1.10 Installation of the area radiation monitor	
		1.1.11 Installation of the floor working table	
		1.1.12 Installation of the hoist and rail for waste transfer	
		1.1.13 Cutting of the measuring instruments tube and cable	
		1.1.14 Removal of the main pipe axial restraints	
		1.1.15 Removal of the insulation for reactor	
		1.1.16 Removal of the lower feeder cabinet and frame	
		1.1.17 Removal of the upper feeder cabinet and frame	
	1.2 Removal of the reactor internals and cutting of the connecting piping		
		1.2-1 Removal of the horizontally installed internals and related piping in the reactor	
		1.2-1.1 Cutting of the moderator inlet and outlet pipe	
		1.2-1.2 Removal of the ion chamber and housing	
		1.2-1.3 Removal of the horizontal neutron flux meter	
		1.2-1.4 Cutting of the poison injection system pipe	
		1.2-2 Removal of the vertically installed internals and related piping in the reactor	
		1.2-2.1 Cutting and removal of the head tank pipe	
		1.2-2.2 Cutting and removal of the moderator rupture disc	
		1.2-2.3 Removal of the mechanical control absorber	
		1.2-2.4 Removal of the adjuster rod	
		1.2-2.5 Removal of the shut off rod	
		1.2-2.6 Removal of the moderator cover gas system cable	
		1.2-2.7 Removal of the reactivity mechanism deck	
		1.2-2.8 Removal of the vertical neutron flux meter	
		1.2-2.9 Removal of the liquid zone controller	
		1.2-2.10 Removal of the viewing port	
		1.2-2.11 Removal of related cables and helium gas piping	
		1.2-2.12 Installation of the cover for the removed reactivity control device, etc.	

Table 7. Continued

L1	L2	L3	Details of work
1. Dismantling the PHWR reactor assembly			
	1.3 Removal of the coolant feeder		
		1.3.1 Preparation of coolant feeder removal	
		1.3.2 Cutting and removing the lower cantilever support	
		1.3.3 Cutting the lower spacer of the lower feeder	
		1.3.4 Cutting the upper spacer of the lower feeder	
		1.3.5 Removal of the fuel channel plug	
		1.3.6 Separation of the feeder coupling assembly	
		1.3.7 Removal of the lower vertical feeder	
		1.3.8 Removal of the lower horizontal feeder	
		1.3.9 Removal of the measuring instruments and cable	
		1.3.10 Cutting of the feeder freezing jacket and support	
		1.3.11 Removal of the upper feeder	
		1.3.12 Removal of residues from cantilever support assembly	
		1.3.13 Installation of the shield on the cantilever support	
	1.4 Removal of fuel channel assembly and calandria tube		
		1.4.1 Preparation for removal of the fuel channel assembly and calandria tube	
		1.4.2 Installation of the fuelling machine bridge crane assembly	
		1.4.3 Installation of the fuel channel assembly workbench	
		1.4.4 Installation of the heavy component workbench	
		1.4.5 Removal of the locator	
		1.4.6 Cutting and removal of the end fitting annular bellows	
		1.4.7 Cutting the pressure tube	
		1.4.8 End fitting rotation	
		1.4.9 End Fitting removal	
		1.4.10 Pressure tube removal	
		1.4.11 Dismantling of the calandria tube insert	
		1.4.12 Removal of the calandria tube insert	
		1.4.13 Removal of the calandria tube	
	1.5 Removal of control and monitoring mechanisms in the reactor reactivity device		
		1.5.1 Dismantling of the interferences to removal reactivity devices	
		1.5.2 Removal of the vertically installed reactivity devices and piping	
		1.5.3 Removal of the horizontally installed reactivity devices and piping	
	1.6 Removal of end shield components and calandria		
		1.6.1 Removal of the carbon steel balls in the end shield	
		1.6.2 Removal of the end shield components	
		1.6.3 Removal of the reactor body (Calandria)	
		1.6.4 Removal of the calandria and Earthquake Restraint	
		1.6.5 Removal of the calandria concrete structure	

3.2. 사전 작업

사전 작업은 원자로집합체 제거 작업을 수행하기 위해서 원자로건물에서 준비해야 할 사항이며 다음과 같은 작업이 사전에 수행된다.

3.2.1. 해체 수행 전, 완료되어야 하는 작업

원자로집합체 해체작업 전의 사전에 조치 완료되어야 하는 작업으로 해체작업을 위한 초기조건에 해당되는 아래 사항은 계통 배수 및 건조까지 완료된 상태이어야 한다.

- 핵연료 제거
- 냉각재 중수 배수/세정/건조
- 감속재 중수 배수/세정/건조
- 종단차폐계통 배수
- 간섭설비 철거(PHT 오일수집탱크, Local air cooler, Blow-out panel, 콘크리트 냉각팬 등)
- 작업편의설비 설치(고하중용 작업대, 폐기물 운반용 임시레일 등)
- 원자로 해체에 필요한 각종 장비는 사전에 개발 및 준비 완료

3.2.2. 작업지역 점검 및 검사

- 각종 해체장비 설치 지역에 대한 공간 확보/간섭 여부 확인
- 해체장비 및 공구 등의 전원 및 유틸리티 공급원 등에 대한 검사 및 확인
- 반응도제어기기 등 기타설비 위치 확인
- 방사선 준위 조사, 치수 점검 및 확인

3.2.3. 해체 준비 작업

- 반응도제어기기 설치대 보호덮개 설치
- 연료교환기 브리지 상부작업대 설치
- 방사성 환기 계통 설치
- 해체 공사 제어실 설치
- 화상감시장비 설치 및 시험
- 음성통신장비 설치 및 시험
- 방사선 지역감시기 설치
- 계측기관 및 케이블 절단
- 원자로 전면보온재 제거
- 상하부자관 캐비닛 및 프레임 제거

3.3. 원자로 내장품 제거 및 연결 배관 절단

수평 및 수직방향으로 원자로와 연결된 배관, 반응도 측정을 위한 계측기 및 반응도제어기기의 내장품을 제거한다. 내장품 제거 시 관련 케이블 및 판넬 등도 같이 제거한다.

3.3.1. 원자로에 수평으로 설치된 내장품 제거

① 감속재 입구 및 출구 배관 절단

- 원자로 칼란드리아 격실 외부에서 절단 및 해체할 감속재 입구 및 출구 배관은 각각 2곳이며, 입구배관은 칼란드리아 격실 내에서 원자로 안으로 4개씩 총 8개 배관으로 분기된다(Fig. 5 참조).

② 전리함 하우징 및 전리함 제거

- 원자로 2개면에 각각 3개씩 설치되어 있는 전리함 하우징을 제거한다.

③ 수평 중성자속 계측기 제거

- 계측기 집합체, 안내관 및 Thimble로 구성된 수평 중성자속 계측기를 제거한다.

④ 독물질 주입계통 배관 절단

- 칼란드리아 격실과 연결된 독물질주입계통의 6개의 노즐을 절단 및 해체한다. 노즐 절단 및 해체 시, 칼란드리아 내부에 삽입되어 있는 주입 배관도 제거한다(Fig. 6 참조).

3.3.2. 원자로에 수직으로 설치된 내장품 제거

① Head tank 배관 절단 및 제거

- 칼란드리아 내 감속재의 온도변화에 따른 체적 변화

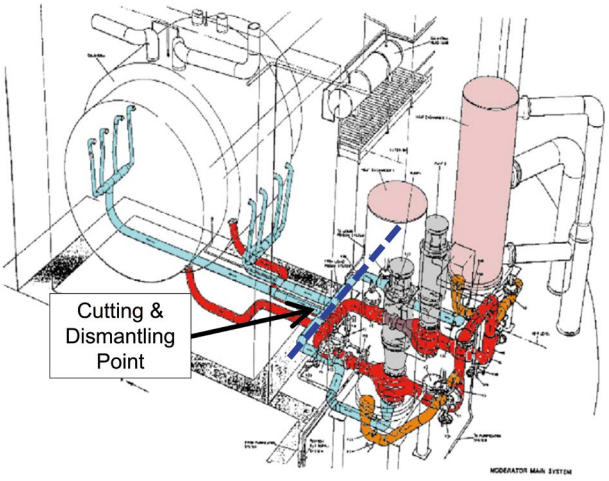

Fig. 5. Moderator cooling system [21].

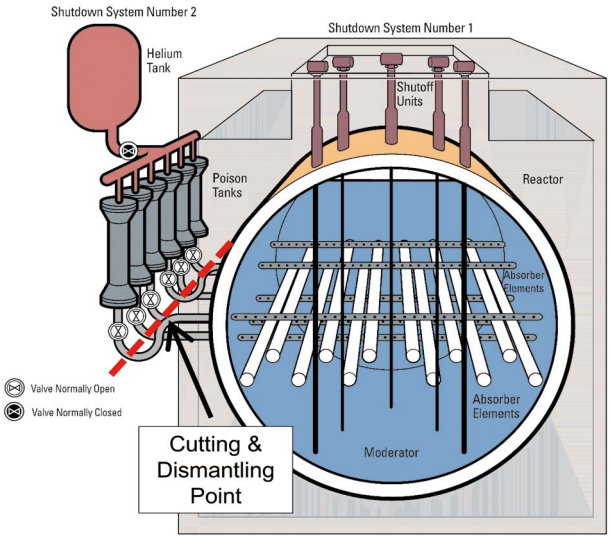

Fig. 6. Safety shutdown system [22].

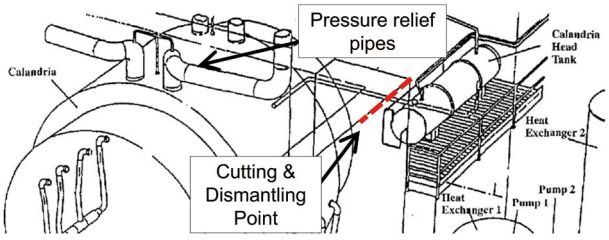

Fig. 7. Calandria head tank [21].

를 수용하는 Head tank 배관을 칼란드리아 격실 바깥쪽에서 절단한다(Fig. 7 참조).

② 감속재 파열판 절단 및 제거

- 칼란드리아에는 4개의 압력 방출 배관이 설치되어 있다. 이 배관들은 칼란드리아 상부로부터 나와서 칼란드리아 격실을 통과하여 칼란드리아 격실 상부에 위치한 파열판까지 연결된다.
- 파열판은 칼란드리아 제거 시 간섭되지 않도록 칼란드리아 격실과 연결된 부분을 절단 및 해체한다.

③ 흡수봉, 조절봉, 정지봉 제거

- 흡수봉, 조절봉, 정지봉은 각각 흡수체, 안내관 및 구동기기로 구성되어 있다.
- 제거해야 할 수량: 흡수봉 4개, 조절봉 21개, 정지봉 28개

④ 상승기체계통 케이블 제거

- 감속재계통 상승기체계통과 관련한 전기 판넬과 관련케이블을 제거한다.

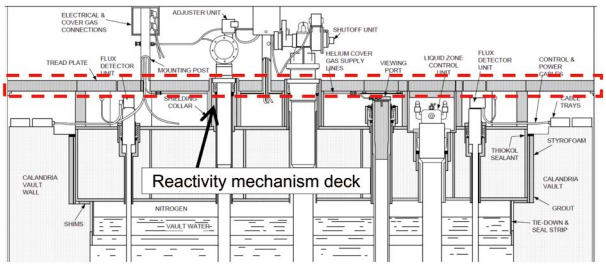

Fig. 8. Reactivity mechanism deck [7].

⑤ 반응도 장치대 제거(Fig. 8 참조)

- 각종 반응도 장치 기구가 설치되어 있는 Deck로서 장치대 위로 돌출된 기기들을 먼저 제거하고 장치대 하부에 설치되어 있는 기기들은 장치대를 제거한 후에 제거한다.

⑥ 수직 중성자속 계측기 제거

- 수직 중성자속 계측기는 계측기 튜브, 안내관 및 Thimble, 구동기기로 구성되어 있다.
- 제거해야 할 수량: 26개

⑦ 액체영역제어기 제거

- 노심 내 수직으로 설치된 6개의 액체영역제어기를 제거한다.

⑧ 관찰구(Viewing port) 제거

- 노심 내 검사 및 가동용 계측기를 삽입하기 위한 2개의 관찰구를 제거한다.

⑨ 관련 케이블 및 헬륨가스 배관 제거

- 반응도 장치대를 제거한 후에 노출되는 각종 케이블과 헬륨가스 배관을 제거한다.

⑩ 제거된 반응도제어기기 등에 덮개 설치

- 작업자 안전사고를 방지하고 칼란드리아 내부로 불필요한 이물질이 유입되지 않도록 각종 반응도 제어기구 등을 제거한 후에 노출되는 빈 공간에 덮개를 설치한다.

3.4. 냉각재 공급자관 제거

3.4.1. 냉각재 공급자관 제거 준비

냉각재 공급자관은 각 원자로면에 380개가 있으며 관련 기기와 함께 제거한다. 냉각재 공급자관 제거를 위해 아래와 같은 내용이 사전에 수행되었는지 확인한다.

- 자관 캐비닛 제거
- 원자로 전면보온재 제거

– 연료교환기는 철거하고 연료교환기 브리지 상부작업대 설치 및 브리지 제어회로 변경
– 냉각재 공급자관 제거장비 설치 및 운전상태 확인

3.4.2. 냉각재 공급자관 제거 공정

① 캔틸레버 지지대 및 하부자관 상하부 스페이서 절단 및 제거
- 자관 제거작업을 수행하는 동안 하부 자관에 방해되지 않도록 캔틸레버 지지대, 자관 상하부 스페이서를 절단 및 제거한다.
- 상부자관 캐비닛 및 프레임 제거작업, 하부 캔틸레버 지지대 제거작업, 하부자관의 상하부스페이서 절단 작업은 함께 병행해서 수행 가능하다.

② 연료채널마개 제거
- 원자로 면당 380개의 연료관집합체마개를 제거한다.

③ 자관연결집합체 분리
- 원자로면에서 자관을 제거하기 위해 자관연결집합체를 분리한다.

④ 하부 수직, 수평자관 제거
- 하부 수직, 수평자관의 현장용접부를 절단하고 하부 수직, 수평자관을 제거한다. 하부 수평자관 제거 시, 이와 병행해서 자관 계측기기 및 케이블, 자관 결빙재킷관 및 지지대를 절단 및 제거한다(Fig. 9 참조).

⑤ 자관 계측기관 및 케이블 제거, 자관 결빙재킷관 및 지지대 절단

⑥ 상부자관, 캔틸레버 지지대 집합체 잔여물, 하부자관 캔틸레버 지지대 부품 제거
- 하부자관 제거 후 상부자관을 제거한다. 상부자관 제거작업은 캔틸레버 지지대 집합체의 잔여물 제거작업, 하부자관 캔틸레버 지지대 부품 제거작업과 병행해서 수행 가능하다.

⑦ 캔틸레버 지지대에 차폐체 설치
- 압력관 제거작업 중 방사선 준위를 낮추기 위해 캔틸레버 지지대에 차폐체를 설치한다.

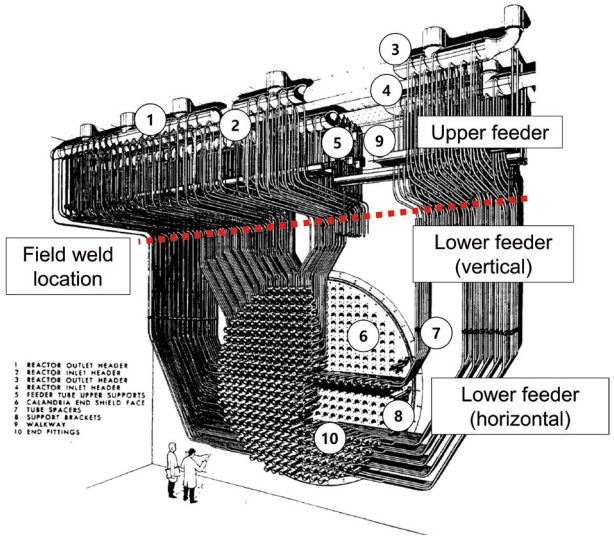

Fig. 9. Feeder pipes layout [23].

3.5. 연료관집합체 및 칼란드리아관 제거

3.5.1. 연료관집합체 및 칼란드리아관 제거 준비

– 자관 및 자관 캐비닛을 제거
– 엔드피팅 자관포트를 밀봉
– 연료관집합체 작업대와 중량물 작업테이블설치

3.5.2. 연료관집합체 및 칼란드리아관 제거 공정

① 연료교환기 브리지크레인 집합체 설치
- 연료관집합체 작업대에서 장비를 운반하고 지지하기 위한 연료교환기 브리지크레인 집합체를 설치한다.

② 연료관집합체 작업대 설치
- 연료관집합체 및 칼란드리아관의 제거장비, 작업대 및 작업자를 지지하기 위한 연료관집합체 작업대를 설치한다.

③ 중량물 작업대 설치
- 연료관집합체 작업대에 있는 대형 제거장비를 지지하며 원자로면을 따라 수평으로 움직이는 중량물 작업대를 설치한다.

④ 위치고정기 제거
- 연료관집합체 및 칼란드리아관의 위치고정기를 제거한다.

⑤ 엔드피팅 환형벨로우즈 절단 및 제거
- 엔드피팅 몸체에서 환형벨로우즈를 절단 및 제거한다.

⑥ 압력관 절단
- 벨로우즈 절단장비, 위치고정기 제거장비를 연료관집합체 작업대에서 제거하고 압력관을 엔드피팅으로부터 분리한다.

⑦ 엔드피팅 회전
- 격자에서 엔드피팅을 쉽게 제거할 수 있도록 엔드피팅을 회전시킨다. 엔드피팅 회전은 압력관 절단작업

과 병행해서 수행한다.

⑧ 엔드피팅 제거

- 엔드피팅 제거장비를 격자 위치에 맞춘 후에 엔드피팅의 안쪽을 잡아서 엔드피팅을 인출한다.

⑨ 압력관 제거

- 감용장비 및 격자슬리브 취급장비를 중량물 작업대에 장착한다. 감용장비의 인출장치가 격자 내부로 들어가서 압력관을 잡아 인출하며, 인출되는 압력관은 납작한 조각으로 만들어 부피를 감용한다.

⑩ 칼란드리아관 삽입체 해체, 제거

- 칼란드리아관 제거를 위해 칼란드리아관 삽입체를 해체 및 제거한다.

⑪ 칼란드리아관 제거

- 칼란드리아관 보조장비와 감용장비를 중량물 작업대에 장착한다. 감용장비의 인출장치가 격자 내부로 들어가서 칼란드리아관을 잡아 인출하며, 인출되는 칼란드리아관은 납작한 조각으로 만들어 부피를 감용한다.

3.6. 원자로집합체 제어 및 감시기구 제거

3.6.1. 반응도제어기기 제거 시, 간섭물 제거

원자로에 내장된 반응도제어기기는 앞서 제거가 완료된 상태이며, 향후 Thimble 및 칼란드리아를 제거하기 위해 반응도제어기기 상부 지역의 강 구조물과 콘크리트를 제거하여 작업 구역을 확보한다(Fig. 10 참조).

3.6.2. 상부 반응도제어기기 및 배관 제거

원자로 상부에 연결된 각종 반응도제어기기 관련 배관을 해체 및 제거한다. 앞에서 제거된 반응도제어기기 외에 원자로에 돌출된 부분을 제거하는 것으로 필요에 따라 제거하지 않고, 칼란드리아 제거 시 함께 제거할 수 있다(Fig. 11 참조).

3.6.3. 측면 반응도제어기기 및 배관 제거

원자로 측면에 연결되어 있는 각종 감시 및 제어기기를 제거한다. 측면 감시 및 제어기기는 앞서 원자로 내장품 제거 시, 완벽히 제거된 경우에는 생략할 수 있다(Fig. 11 참조).

3.7. 종단차폐체 구성품 및 원자로 본체 제거

3.7.1. 종단차폐체 내의 탄소강볼 제거

종단차폐체 내에서 탄소강볼을 제거하기 위한 개구부를

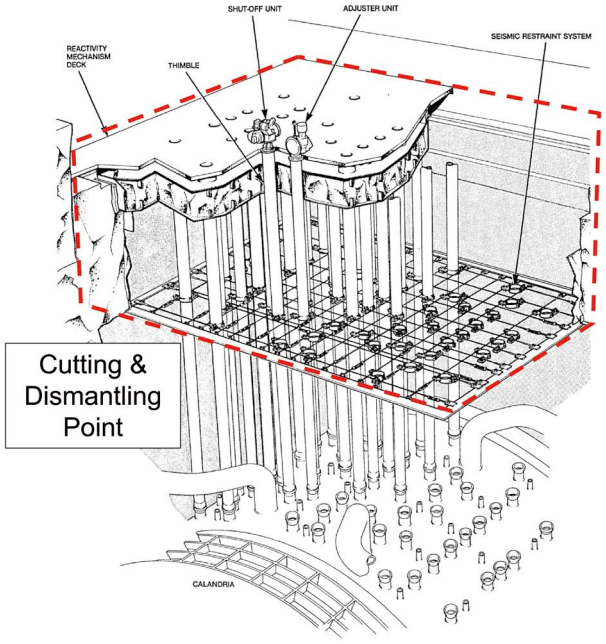

Fig. 10. Reactivity device [7].

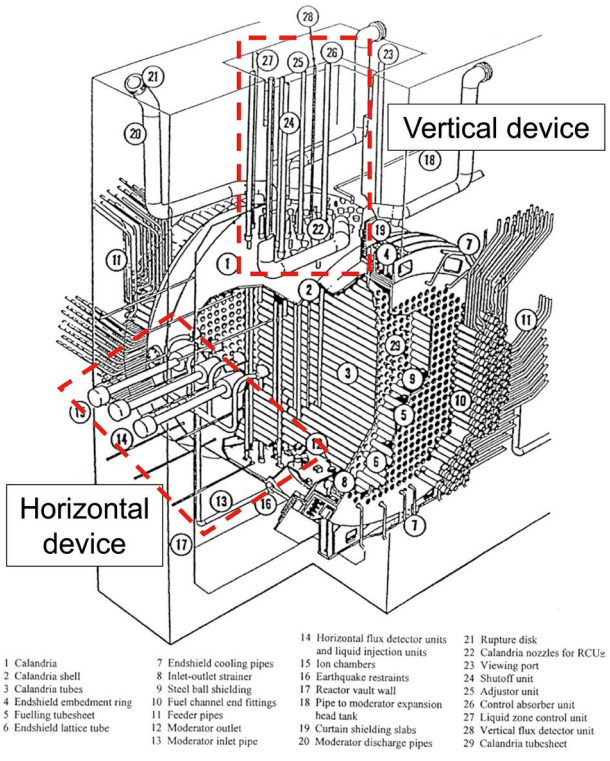

Fig. 11. CANDU6 reactor assembly [5].

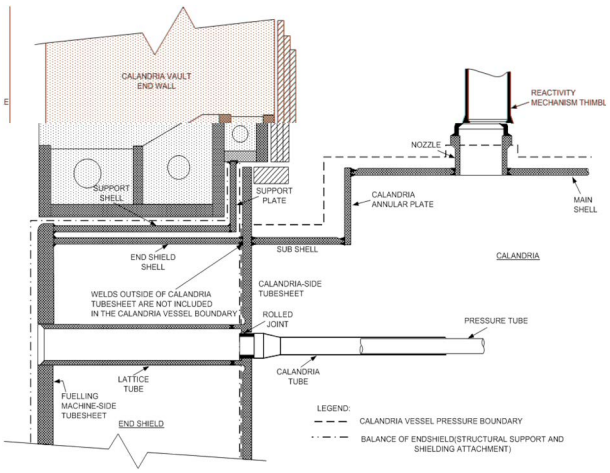

Fig. 12. End shield component [7].

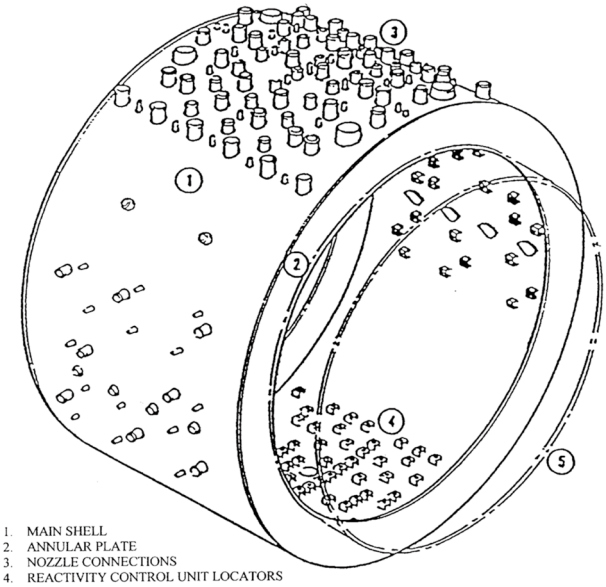

Fig. 13. Calandria shell [5].

만든다. 개구부는 각 원자로 면당 1개를 만든다. 이 개구부를 통해서 탄소강볼을 제거한다.

3.7.2. 종단차폐체 구성품 제거(Fig. 12 참조)

① Fuelling tube sheet
② Calandria tube sheet
③ End shield shell
④ Lattice tube
⑤ End shield support shell
⑥ End shield support plate
⑦ Lead and stainless steel wool shielding
⑧ End shield embedment ring
⑨ Curtain shielding slabs

3.7.3. 원자로 본체(칼란드리아) 제거

칼란드리아관을 모두 제거하고 남은 칼라드리아 제거작업을 수행한다. 현재까지 칼란드리아를 제거하는 방법 및 장비들이 구체화되지 않고, 연구개발 과제 등이 진행 중이므로 개발되는 장비에 따라서 해체 방법 등도 구체적으로 변경될 수 있다.

① 원자로 본체(칼란드리아) 제거
- 1개의 Main shell, 2개의 Sub shell, 2개의 Annular plate를 제거한다(Fig. 13 참조).

② 원자로 본체 Earthquake restraint 제거
③ 원자로 본체 콘크리트 구조물 제거

4. 고찰 및 결론

중수로 원전을 해체한 사례는 전 세계적으로 없으며, 현재 중수로 원자로집합체 해체와 관련된 유사한 사례는 압력관(연료관)과 칼란드리아관 교체 경험이다. 현재 캐나다에서는 브루스원전, 피커링원전 및 달링턴원전 해체가 계획되어 해체사업이 진행되고 있고, 한국수력원자력(주)은 해체 전문가 5명을 캐나다에 파견하여 해체폐기물 관리 및 공정사업 개발에 참여할 예정이다. 국내에서는 월성1호기 압력관(연료관)과 칼란드리아관 교체 사례가 있으며, 본 논문은 이 사례를 참고하여 중수로 원자로집합체 해체 표준작업 및 공정을 살펴보았다. 중수로 원자로집합체 해체는 원자로집합체의 특수한 구조를 고려하여, 원자로집합체 구조에 대한 설명과 해당 구조물을 해체하는 순서를 기준으로 표준작업 및 공정을 작성하였다. 이에 따른 중수로 원자로 해체 표준작업 및 공정은 다음과 같다.

① 사전 작업
② 원자로 내장품 제거 및 연결 배관 절단
③ 냉각재 공급자관 제거
④ 연료관 및 칼란드리아관 제거
⑤ 원자로집합체 제어 및 감시기구 제거
⑥ 종단차폐체 구성품 및 원자로 본체 제거

다만, 앞서 도출한 표준작업 및 공정에는 해체에 필요한 장비, 투입인력, 해체 기간 등이 추가 고려되어야 한다. 국내는 물론 국외에서도 중수로의 해체 경험은 없는 상태이므로 특히 원자로 해체 관련한 일정 등은 향후 더 구체적인 방안과 기술을 개발하여 구체화해야 한다. 월성1호기 압력관 및 칼란드리아관 교체 기간 중에 사용한 각종 장비는 원자로를 재사용하기 위해 사용한 장비이며, 중수로 해체 시 사용하는 장비는 이들 장비처럼 정밀하게 제작할 필요는 없다. 다만 이들 장비를 참조해서 해체용 신규장비를 개발해야 하며, 이러한 장비 개발은 원자력발전소 사업자인 한국수력원자력(주)의 연구개발 과제 등을 통해 개발 및 시험되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20191510301180).

참고문헌

1. Yeo JS. 2019. KISTEP Technology Trend Brief - Decommissioning of nuclear power plants. Korea Institute of Science and Technology Opportunity Assessment. p. 7.
2. Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. 2021. Current status of KHNP's nuclear power plant decommissioning project. The basic course of decommissioning a nuclear power plant. The Korea Atomic Industrial Forum.
3. Korea Atomic Energy Research Institute. 2018. Nuclear decommissioning industry advancement task. Nuclear Policy Brief Report.
4. Nuclear Power Generation White Paper. 2016. Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. [Edit]. pp. 228-230.
5. IAEA. 2001. Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: CANDU reactor assemblies, IAEA-TECDOC-1197. pp. 7-9.
6. Choi S-N, Yang S-O, Kim K-I and Lee H-J. 2016. Development of Fuel Channel Inspection System in PHWR. *J. Korean Soc. Nondestruc. Test.* **36**(1):60-67.
7. Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. 2021. Final safety analysis report for public release of Wolsong Unit 1 Chapter 4 reactor, Chapter 5 reactor process system.
8. Jeong K-S, Lee D-G, Jung C-H and Lee K-W. 2006. Calculating the Unit Cost Factors for Decommissioning Cost Estimation of the Nuclear Research Reactor. *JNFCWT* **4**(4):25-31.
9. TLG Services, Inc. 2007a. Decommissioning Cost Analysis for the Zion Nuclear Station. E16-155-004, Rev.0. Section 3. p.2, Appendix F. pp. 1-8.
10. Ministry of Trade, Industry and Energy Notice No. 2021-137, Standards for compensation for engineering projects.
11. LaGuardia TS. 1986. AIF/NESP-036. Guidelines for producing commercial nuclear power plant decommissioning cost estimates. pp. 5-9 - 5-13.
12. TLG Services, Inc. 2014. Decommissioning Cost Analysis for the Monticello Nuclear Station. X01-1617-006, Rev.0. Section 3. p. 2.
13. TLG Services, Inc. 2007b. Decommissioning Cost Analysis for the Vermont Yankee Nuclear Station. E11-1559-002, Rev.0. Section 3. p. 2.
14. TLG Services, Inc. 2018. Decommissioning Cost Analysis for the Crystal River Unit 3 Nuclear Station. D03-1744-001, Rev.0. Section 3. p. 2.
15. TLG Services, Inc. 2013. Decommissioning Cost Analysis for the Oconee Nuclear Station. D03-1671-003 Rev.0. Section 3. p. 2.
16. TLG Services, Inc. 2010. Decommissioning Cost Study for the Point Lepreau Generation Station. N29-1632-002 Rev.0. Section 3. p. 2.
17. Hansson T, Norberg T and Knutsson A. 2013. An assessment of the decommissioning cost for the Ringhals site. SKB R-13-05. p. 25.
18. LaGuardia TS. 2013. Cost Estimating for Decommissioning Nuclear Reactors in Sweden, Report No. 2014:01. p. 22.
19. Engineering Total Information System. https://www.etis.or.kr/
20. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. 2020. 2020 Construction Standard Estimating System (civil engineering, construction, mechanical equipment). pp. 76-77.
21. Kim JH, Jin DS and Chang SH. 2013. Development of safety analysis methodology for moderator system failure of CANDU-6 reactor by thermal-hydraulics/physics coupling. *Nucl. Eng. Des.* **263**:241-254.
22. ENEA. 2016. Implementation of a cross sections evaluation methodology for safety margin analysis: application to gadolinium odd isotopes, Rev.0. p. 5.
23. IAEA. 1998. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: CANDU pressure tubes. IAEA-TECDOC-1037. p. 11.