

Calculating the Unit Cost Factors for Decommissioning Cost Estimation of the Nuclear Research Reactor

연구용원자로 해체비용 산정을 위한 단위비용인자 산출

Kwan-Seong Jeong, Dong-Gyu kee, Chong-Hun Jung and Kune-Woo Lee
Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Deokjin-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon

ksjeong1@kaeri.re.kr

정관성, 이동규, 정종현, 이근우
대전광역시 유성구 덕진동 150, 한국원자력연구소

(Received July 14, 2006 / Approved September 12, 2006)

Abstract

The estimated decommissioning cost of nuclear research reactor is calculated by applying a unit cost factor-based engineering cost calculation method on which classification of decommissioning works fitted with the features and specifications of decommissioning objects and establishment of composition factors are based. Decommissioning cost of nuclear research reactor is composed of labor cost, equipment and materials cost. Labor cost of decommissioning costs in decommissioning works are calculated on the basis of working time consumed in decommissioning objects.

In this paper, the unit cost factors and work difficulty factors which are needed to calculate the labor cost in estimating decommissioning cost of nuclear research reactor are derived and figured out.

Key words : Research Reactor, Decommissioning Cost Estimation, Unit Cost Factor

요 약

연구용원자로 해체비용은 해체대상물에 대한 특성 및 제원에 맞게 해체작업을 분류하고 구성요소를 설정하여 단위비용인자를 바탕으로 한 공학적 비용 산정 방법으로 해체비용을 산정한다. 연구용원자로에 대한 해체비용은 크게 인건비, 장비 및 재료비로 구성이 되는데 해체작업에 소요되는 인건비는 해체대상물에 소요되는 작업시간을 바탕으로 계산을 한다.

본 논문에서는 연구용원자로 해체비용 산정 시 인건비 계산에 필요한 단위비용인자 및 작업

난이도 인자를 산출하였다.

중심 단어 : 연구용원자로, 해체비용 산정, 단위비용인자

I. 서론

원자력시설에 대한 운전정지 후 해체를 수행하기 위하여 사전 준비 작업으로 해체비용을 산정을 해야 한다. 원자력시설에 대한 해체비용 산정은 원자력시설의 부지 및 해체대상물의 특성에 따라 해체비용 산정이 다르게 나타나고 비용 산정 결과에 대한 불확실성이 높은 게 사실이다. 따라서 공학적 비용 산정 방법으로 해체시설 및 대상물의 특성에 맞게 해체작업을 분류하여 구성요소를 설정하고 해체비용 산정에 필요한 비용항목 및 비용인자를 산출하여 해체비용을 산정해야 한다. 즉, 원자력시설에 대한 해체 작업 분류 및 소요 자원에 대한 단위비용인자 산출을 바탕으로 항목별 비용을 산정하여 전체 해체작업 비용을 산정해야 한다. 이와 같이 원자력시설에 대한 해체비용 산정은 해체 시설 및 대상물에 대한 비용항목을 해체작업에 맞게 표준화하여 구성을 해야 하며 비용에 영향을 미치는 단위비용 인자 및 작업난이도 인자를 도출하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 연구용원자로 해체비용 산정을 하기 위해서 인건비 계산에 필요한 단위비용 인자 및 작업난이도 인자를 도출하고자 한다.

II. 연구용원자로 해체비용 산정 방법

가. 연구용원자로 해체비용 산정 절차

연구용원자로에 대한 해체비용 계산 절차는 Figure 1과 같이 먼저 해체 시설의 구성요소 및 오염 정도를 파악하여 해체대안을 결정하고 해체일정에 따라 해체대상물에 맞는 작업 내용을 완성한다. 해체 대상물의 작업에 대한 비용은 작업시간을 바탕으로 인건비, 이때 투입되는 장비 및 재료 비로 구성되어 계산된다. 해체비용 산정 절차에서 가장 중요한 부분은 해체활동에 대한 비용을 산정하기 위해 해체비용

항목, 단위비용인자 및 작업난이도 인자를 구성하는 부분이다[1].

해체비용 항목이란 연구용원자로 해체비용을 산정하기 위해서 해체 시설 대상물의 구성요소와 해체 작업의 내용을 의미한다. 즉 해체활동을 수행하기 위해 필요한 작업 분류 및 소요 자원을 의미한다. 그리고 단위비용인자란 단위능률 기준에 대한 수치, 즉, 콘크리트 단위 면적 제거에 필요한 작업시간 등 단위요소를 의미하고, 비용 산정 시 해체대상물의 규모를 곱하여 계산하면 된다. 또한, 작업난이도 인자란 어느 특정한 해체작업을 수행하는 데 요구되는 평균 시간 외에 회피할 수 없는 요인으로 인해 작업지연을 유발시키는 요인을 의미하고, 비용 산정 시 작업시간 증가 비율로 나타낸다.

나. 연구용원자로 해체비용 산정 구조

연구용원자로 해체 비용 산정 구조는 해체 대상 시설의 계통 및 구조, 건축 도면, 배관 및 시설 운전 자료 등 기초 자료에 대한 검토가 이루어져야 한다. 이것을 기초로 하여 해체시설의 대상물 및 구성요소에 대한 적용 기법을 바탕으로 해체작업을 계층구조

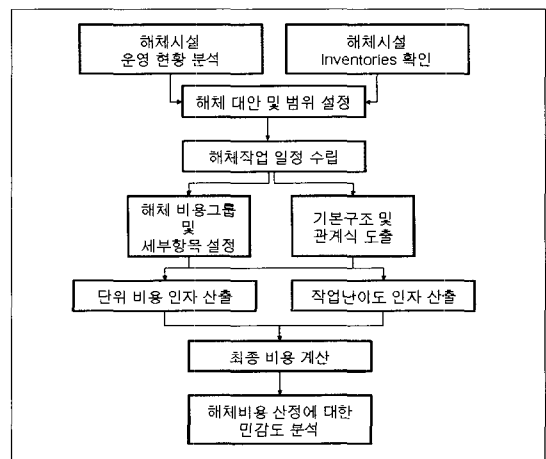


Figure 1. 연구용원자로 해체비용 산정 절차

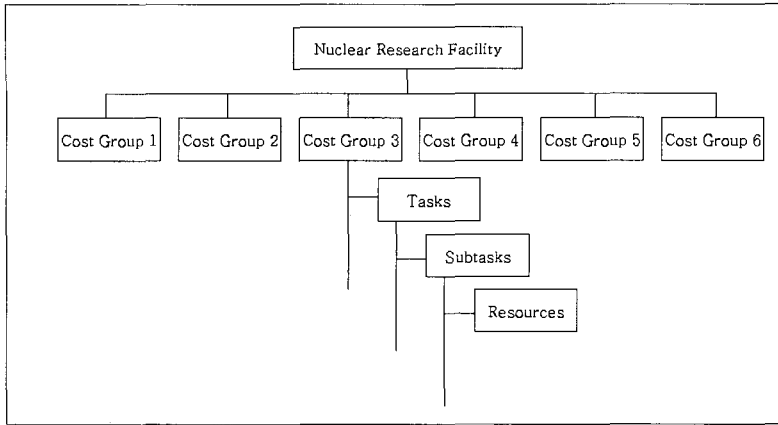


Figure 2. 연구용원자로 해체비용 구조

로 구성하고 비용 항목별로 분류하고 그룹화를 한다. 다양한 활동이 이루어지는 해체작업에서 비용을 산정하기 위해서는 비용 항목별로 상하부 계층구조를 이루게 하여 비용 계산 시 항목별로 그룹화가 가능하도록 해체작업내용을 나눈다[1].

해체 비용 항목에 대한 분류 방법은 동일한 일정 규모의 단위를 바탕으로 수치화가 가능한 기초를 제공하는 단위 비용인자(Unit Cost Factors) 방법을 이용한다. 단위 비용인자 방법은 많은 해체활동 항목에 대하여 해체작업 내용을 수치화하는 경우 단순화하기 위해서 사용하는 방법이다. 특히, 단위비용 인자는 해체활동에 투입되는 인건비, 장비 및 재료에 대한 비용 요소가 누락되지 않도록 하는 기능을 제공한다[2].

연구용원자로의 해체비용 구조는 Figure 2와 같은 계층구조로 총 6개의 비용그룹(Cost Groups), 38개 작업(Tasks)과 46개의 하위 작업(Subtasks) 그리고 투입자원(Resources)으로 구성된다. 최하위 구조인 투입자원은 해체대상물에 소요되는 작업시간을 바탕으로 한 인건비, 장비 및 재료비 그리고 기타 부수비용으로 구성되며, 여기에서 소요되는 인건비는 Man-Hour 단위의 작업시간을 기초자료로 계산된다. 여기에서 투입자원의 구성요소를 이루는 작업시간을 보다 세밀하게 산출하여 공학적으로 비용 산정의 정확성을 높일 뿐만 아니라 작업지연에 대한 작업난이도 인자를 적용하기 용이하도록 아래 Figure 3과 같이 5개의 작업 특징별로 하위 세분화하여 구성된다[1][2].

다. 해체대상물에 대한 비용인자 구성

해체비용 산정 구조의 최하위단계로 구성되는 투입자원에 대한 해체비용 산정은 인건비, 장비 및 재료비로 구분된다. 여기서 인건비는 단위 작업 당 소요되는 작업시간을 바탕으로 계산한다. 단위 작업 당 소요되는 작업시간이란 해체 대상물에 일정한 치수 단위 당 소요되는 기본 작업시간에 일정 규모를 곱하여 최종 산출되는 작업시간을 말한다. 단위 작업 당 소요되는 작업시간은 Man-Hours를 기반으로 계산한다[3][4][5].

해체 비용 산정은 해체대상물의 일정 규격 단위로 해체작업 시 소요되는 작업 시간을 바탕으로 산출하기 때문에 해체 대상물의 구성요소 특징별로 분류를 한다. 대상물의 구성요소 특징별 분류는 측정 가능한 수준까지 해체 작업특징별로 비용 자료를 집계하여 분석이 가능하도록 구분을 하며, 작업 소요 인력은 작업분야별로 직종을 세분화 하고, 장비에 대해서는 투입한 수에 대한 항목 설정을 한다.

인건비 계산에 필요한 단위작업시간을 산출하기 위해서 Table 1과 같이 해체대상물에 대한 단위비용 인자를 재질, 모양, 표면 및 크기별로 분류를 하고

Table 1. 해체대상물 특성 및 형태별 분류 기준

대분류	세분류
재질	철재, 콘크리트, 목재, 기타
크기	길이(또는 직경), 부피(또는 무게)
모양 및 형태	선형, 구형, 실린더형, 직사각형
표면 형태	구조물, 바다, 벽, 천장

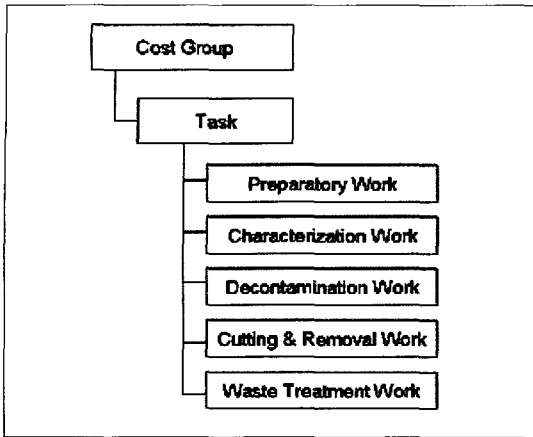


Figure 3. 해체작업의 투입자원에 대한 5개 작업 세분화

해체대상물의 작업 내용에 대해서는 ‘일반 작업’, ‘측정 작업’, ‘제염 작업’, ‘절단 및 제거 작업’, ‘폐기물 취급 작업’ 등 Figure 3과 같이 비용작업(Tasks)을 5개 작업으로 구분 및 일반화하여 해체대상물을 재질과 모양별로 단위비용 인자 및 작업난이도 인자를 적용하여 비용을 산출한다. 이렇게 구분하는 이유는 원자력발전소의 경우 해체 대상물의 구성이 일정하기 때문에 각 컴포넌트별로 단위비용인자를 고려해야 하지만, 연구용원자로의 경우 시설의

용도에 따라 구성요소가 다양하기 때문에 보다 재질과 모양별로 일반화하여 보다 표준화된 단위비용 인자 및 작업난이도 인자를 적용함으로써 공학적으로 신뢰성이 있도록 비용을 산정하기 위함이다[1].

라. 제염 및 해체기법의 시나리오에 대한 비용인자

해체대상물의 여러 가지 해체 기법에 대한 시나리오에 대한 비용인자는 작업지속시간, 비용, 안전성을 기준으로 시나리오 비용 요소를 구성한다. 이때 해체대상물에 대한 제염은 제염 기법의 적용 측면과 안전, 효율성, 비용효과, 그리고 폐기물 최소화 측면을 고려하고 비용 산정 단위는 해체 대상에 대한 표면단위 및 부피단위로 산정한다. 해체대상물에 대한 절단 및 제거작업은 기계적/열적/화학적 과정에 따라 적절한 기법을 선택하고, 비용 산정 단위는 절단 표면단위로 산정한다[6].

Ⅲ. 연구용원자로 2호기 해체 작업시간 분석

연구용원자로 해체비용 산정은 해체시설 및 대상물에 대한 단위작업시간을 바탕으로 계산을 한다.

Table 2. 연구용원자로 2호기 주요 해체대상물의 작업분야별 작업시간 (단위: M · h)

작업 분야	작업 시간						
	노심	빔포트	T/C	RSR	조사관 브릿지	RIP	수조수
일반 작업	393.5	2,754.0	4,341.5	236.0	279.5	10,282.0	386.0
방사선/능 관리	216.5	822.0	1,250.5	129.5	162.0	5,972.0	130.0
폐기물 관리	2.0	10.0	69.0	8.0	74.5	137.0	47.0
품질 관리	134.5	486.5	670.5	63.5	81.0	395.0	77.0
계	746.5	4,072.5	6,331.5	437.0	597.0	14,852.0	640.0

Table 3. 연구용원자로 2호기 절단 및 세척 작업에 대한 작업분야별 작업시간 (단위: M · h)

작업 분야	작업 시간							
	RIP 파이프	RIP 배기덕트	원자로수조 파이프	이끔관	지하Pit 배관	빔포트 Plug	빔튜브	노심 Shroud
일반 작업	146.5	315.0	207.5	64.5	83.5	83.5	30.0	148.5
방사선/능 관리	53.0	69.0	128.0	26.0	-	-	5.5	89.0
폐기물 관리	2.0	-	4.5	15.5	-	-	-	-
품질 관리	64.0	-	66.5	13.0	5.0	5.0	3.0	50.0
계	257.5	384.0	406.5	119.0	88.5	88.5	38.5	287.5

Table 4. 연구용원자로 2호기 폐기물 취급에 대한 작업분야별 작업시간 (단위:M·h)

작업 분야	작업 시간				
	금속/파이프	목재	제염지	철재	콘크리트
일반 작업	356.5	12.0	21.5	309.5	487.5
방사선/능 관리	195.0	32.0	15.0	106.0	87.5
폐기물 관리	20.5	2.5	6.5	6.5	42.0
품질 관리	-	7.5	6.5	40.5	19.5
계	572.0	54.0	49.5	462.5	636.5

Table 5. 연구용원자로 2호기 열교환기 해체 작업분야별 작업시간 (단위:M·h)

작업 분야	작업 내용 및 시간	
	제염	제거
일반 작업	86.5	453.5
방사선/능 관리	49.5	116.5
폐기물 관리	30.5	31.5
품질 관리	21.0	67.0
계	187.5	668.5

단위작업시간을 확보하기 위하여 우리나라 최초의 원자력시설에 대한 해체사업이 이루어지고 있는 연구용원자로 2호기 해체 현장 작업시간을 확보하였다. 연구용원자로 2호기 해체사업은 ‘일반작업’, ‘방사선/능 관리’, ‘폐기물 관리’, ‘품질관리’ 등 작업분야로 구분되어 해체작업인력이 투입되고 있다. 연구용원자로 2호기 해체작업에서 확보한 작업내용과 작업시간을 아래 Table 2에서 Table 10과 같이 해체작업분야별, 해체대상물별 그리고 재질별로 해체작업내용에 대한 작업시간자료를 분류하였다. Table 2에서 Table 10에 나타나 있는 작업시간은 단순히 해체대상물에 대한 작업소요시간의 평균치를 나타낸 것이다.

Table 7. 연구용원자로 2호기 Green House 설치 작업분야별 작업시간 (단위:M·h)

작업 분야	대상물 및 작업시간					
	Exposure Door	환기시설	Beam Port	Graphite	Thermal Column	
					Vertical	Horizontal
일반 작업	69.5	54.0	7.0	36.5	25.0	21.5
방사선/능 관리	-	-	27.5	8.0	-	1.0
폐기물 관리	-	-	-	6.0	-	-
품질 관리	-	-	4.0	1.5	-	1.0
계	69.5	54.0	-	52.0	25.0	23.5

Table 6. 연구용원자로 2호기 비치 설치 작업분야별 작업시간 (단위:M·h)

작업 분야	비체설치 대상물 및 작업시간		
	방사화 콘크리트	Pool Liner	Exposure Door
일반 작업	30.0	22.5	66.0

IV. 연구용원자로 해체 단위비용인자 및 작업난이도 인자 산출

연구용원자로에 대한 해체비용 산정은 해체 시설 및 대상물에 대한 비용항목을 해체작업에 맞게 표준화하여 구성을 해야 하며 비용에 영향을 미치는 단위비용 인자 및 작업난이도 인자를 도출하는 것이 중요하다.

연구용원자로 2호기 실제 해체 경험 자료를 바탕으로 해체대상물 및 구성요소에 대한 해체작업의 인건비 산정에 필요한 재질별 단위작업시간 및 작업난이도 인자를 도출하였다.

Table 11와 Table 12는 연구로 2호기 금속류 및 콘크리트류 해체대상물에 대한 작업시간을 길이 및 부피 단위로 계산출한 단위비용인자 및 단위작업시간이다. Table 11은 연구로2호기 금속류 해체대상물을 모양에 따라 ‘선형’, ‘구형’, ‘실린더형’, ‘직사각형’으로 구분하여, 해체대상물의 작업내용 및 작업자 투입 분야를 ‘일반작업’, ‘측정작업’, ‘제염작업’, ‘절단 및 제거작업’으로 구분하여 소요된 작업시간을 일정 단위로 산출한 것이다. Table 12는 연구로2호기 콘크리트류 해체대상물의 단위작업시간을

나타낸 것인데, 콘크리트류 해체대상물은 금속류 해체대상물과 다르게 구조물로 이루어져 모양 및 형태가 일정하기 때문에 단지 해체작업내용 및 작업자 투입 분야를 '일반작업', '측정작업', '제염작업', '절단 및 제거작업'으로 구분하여 소요된 작업시간을 일정 단위로 산출한 것이다.

또한, 해체작업 시간을 지연시키는 작업난이도는 연구용원자로 2호기 해체대상물을 방사화/비방사화로 구분하였고, 해체대상물의 복합정도를 재질 및 형태별로 구분하고 해체작업에 따른 소요 작업시간을 비교하여 그 차이 및 비율을 바탕으로 작업난이도 인자를 산출하였다.

Table 13와 14는 금속류 및 콘크리트류 해체대상물에 대한 작업난이도 인자 및 가중치이다. Table 13

Table 8. 연구용원자로 2호기 Exposure Room 콘크리트 작업분야별 작업시간 (단위:M·h)

작업 분야	대상물 및 작업 시간	
	방사화 콘크리트	비방사화 콘크리트
일반 작업	1058.5	811.0
방사선/능 관리	262.0	-
폐기물 관리	8.0	-
품질 관리	151.0	-
계	1,479.5	811.0

Table 9. 연구용원자로 2호기 Pool Liner 작업분야별 작업시간 (단위:M·h)

작업 분야	작업 시간		계
	제염	절단	
일반 작업	210.5	791.0	1,001.5
방사선/능 관리	34.5	259.0	293.5
폐기물 관리	6.0	8.0	14.0
품질 관리	19.5	134.0	153.5
계	270.5	1,192.0	1,463.0

Table 10. 연구용원자로 2호기 납 핫셀 구조물 작업분야별 작업시간 (단위:M·h)

작업 분야	대상물 및 작업 시간	
	납 핫셀 콘크리트	납 핫셀 벽돌
일반 작업	616.0	111.0
방사선/능 관리	98.0	85.5
품질 관리	-	17.0
계	714.0	213.5

은 연구로 2호기 금속류 해체대상물에 대하여 먼저 대상물의 구성 상태 및 모양별로 분류하여 여기에 소요되는 작업시간에 대한 차이의 정도를 이용하여 비율을 도출한 것이다. Table 13은 해체대상물의 모양간의 소요된 작업시간을 상호 비교하여 산출한 것이 아니고 단지 동일 모양의 해체대상물에 소요된 작업시간을 비교하여 산출한 것이다. 여기서 해체대상물의 모양 중에서 선형의 가중치가 가장 높게 나타난 이유는 시설의 구성요소 중에서 배관과 같은 선형모양의 해체대상물이 단일 보다 여러 개로 구성되어 있을 경우가 많았을 뿐만 아니라 이에 대한 작업 소요시간이 많이 소요되는 것으로 나타났기 때문이다. Table 14는 연구로 2호기 콘크리트류 해체대상물에 소요되는 작업시간을 이용하여 도출한 것인데, 콘크리트류는 금속류와 같이 여러 가지 모양으로 구성이 되지 않고 단순히 콘크리트 자체만으로 주로 구성이 되기 때문에 방사화된 콘크리트와 비방사화된 콘크리트로 구분하여 해체대상물에 소요되는 작업시간의 차이의 정도를 이용하여 비율을 도출한 것이다.

Table 11. 금속류 해체대상물에 대한 단위작업시간 (단위:M·h/m)

모양 작업	일반작업	측정	제염	절단/제거
선형	15	10	4	51
구형	30	22	8	106
실린더형	64	45	17	224
직사각형	59	43	16	210

Table 12. 콘크리트류 해체대상물에 대한 단위작업시간

작업 구분	일반작업	측정	제염	절단 및 제거
시간	6	5	2	23

Table 13. 금속류 해체대상물에 대한 작업난이도

작업난이도 인자	해체대상물 모양별 작업난이도 가중치			
	선형	구형	실린더형	직사각형
복합도 인자	1.55	1.5	1.4	1.4
방사선/능 인자	2.0			

Table 14. 콘크리트류 해체대상물에 대한 작업난이도

작업난이도 인자	작업난이도 가중치
방사선/능 인자	2.0

단위비용인자와 작업난이도 인자를 이용한 해체 비용 산정은 해체대상물의 작업 조건에 따라 해체작업에 소요되는 단위작업시간과 추가 작업소요시간을 산출함으로써 해체작업에 소요되는 인건비를 산출하고, 여기에 소요되는 장비 및 재료비를 합산함으로써 해체대상물별 소요되는 단위작업에 대한 해체비용 산정하게 된다.

V. 결론

본 논문에서는 연구용원자로 해체비용 산정을 하기 위해서 인건비 계산에 필요한 단위비용 인자 및 작업난이도 인자를 도출하였다. 단위비용인자는 금속 및 콘크리트 해체대상물의 모양과 작업분야에 따라 단위당 소요되는 작업시간을 산출하였다. 작업난이도 인자는 금속 및 콘크리트 해체대상물의 모양에 따라 대상물 구성의 복잡도와 방사화/비방사화로 구분하여 작업난이도 인자 및 가중치를 산출하였다. 이 두 가지 인자는 해체대상물에 소요되는 기본 작업시간과 추가 작업시간을 산출하는데 이용하며 여기에 작업분야, 작업직종과 인건비 단가를 직접 곱함으로써 인건비가 계산이 된다. 결과적으로, 본 논문에서 도출한 비용인자를 연구용원자로 및 원자력연구시설에 대한 해체비용 산정에 적용할 경우 비용 산정 결과에 대하여 공학적 신뢰성을 한층 높일 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 주관하는 원자력 중·장기 연구개발사업의 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

[1] K.S.Jeong, D.G.Lee, K.W.Lee, C.H.Jung, W.Z.Oh, J.H. Park, " A Framework of Decommissioning Cost Estimation for Nuclear Research Facilities", KRWS, Vol. 4(2), p171-178,

2006

- [2] "A Proposed Standardized List of Items for Costing Purposes", OECD/NEA, 1999
- [3] "Cost Estimator's Reference Manual", A Wiley-Interscience Publication, 1995
- [4] "Decommissioning Handbook", ANL, 2002
- [5] "Guidelines for Producing Commercial Nuclear Power Plant Decommissioning Estimates", AIF/NESP-036, Vol.1 and 2, 1986
- [6] " Development of methodology for cost calculations of decommissioning operations", EDF/FRAMATOME, Task 1, 2000