

# Status of Nuclear Power Plant Decommissioning Cost Analysis in USA

Sanghwa Shin,<sup>1,\*</sup> Soonyoung Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Radiological Science, Catholic University of Pusan

<sup>2</sup>Radiation Core Technologies, Co., Ltd.

Received: January 18, 2018. Revised: April 16, 2018. Accepted: April 30, 2018

## ABSTRACT

Assessment of NPP(Nuclear Power Plant) decommissioning cost is very important for safe decommissioning of nuclear power plants. In the United States, which has the most NPP decommissioning experience, the cost evaluation study has been conducted since the 1970s in order to decommissioning nuclear facilities. The US NRC has conducted studies on decommissioning technology, safety and cost for a variety of reactor type and nuclear installations. In the total decommissioning costs, the end of operation licenses accounted for the largest portion, followed by spent fuel management and site restoration. In case of immediate decommissioning, spent fuel management cost increased compared to delayed decommissioning, and delayed decommissioning increased the cost of terminating the operation license. However, in general, delayed decommissioning does not show any significant benefit as compared with immediate decommissioning. It is necessary to consider the evaluation according to the site conditions when evaluating the cost of decommissioning domestic nuclear power plants. Also, in Korea, IAEA recommendations were applied to reorganize the radioactive waste classification system. Therefore, it is necessary to develop a method to appropriately use the decommissioning data of the preceding US Nuclear Power Plant in the new classification system when estimating the amount of radioactive waste generated during decommissioning. In particular, the establishment of the evaluation methodology for the waste to be disposed of will be an important factor in securing the accuracy of the decommissioning cost. In addition, it is necessary to construct information data that can be applied to facility characteristics and work characteristics in order to evaluate the cost of demolition of domestic nuclear power plants.

Keywords: Nuclear Power Plant, Radioactive waste, Decommissioning, Cost

## I. INTRODUCTION

국내 원자력발전소의 안전한 해체를 위해 원전 해체 비용 평가는 매우 중요한 요소이며, 해체 전략에 따라 충분한 기술과 ALARA(As Low As Reasonably Achievable)에 따른 방사선 관리를 평가함에 있어 해체비용 평가는 필수적이다. 국내의 경우 고리 1호기와 월성 1호기 등의 해체를 대비하여 다양한 연구가 진행되고 있으며 해체비용 평가 역시 주요 연구 중의 하나이다. 그러나 2기의 연구용 원자로 해체 경험만으로 상업용원자로를 평가함에 어려움이 있다.

원전해체 선행국가로는 미국, 영국, 독일, 일본 등

을 들 수 있다. 이중 가장 많은 원전 해체 경험을 보유한 미국의 경우 1970년대부터 원자력시설의 해체를 위하여 비용 평가 연구를 진행하였다. 미국의 경우 원전 운영 정지 및 해체를 위한 규정에 따라 해체비용 평가를 수행하여야 하며, 이를 뒷받침하기 위하여 U.S. NRC(Nuclear Regulatory Commission)는 다양한 노형 및 원자력시설에 대한 해체 기술, 안전성 및 비용에 대한 연구를 수행하였다. NRC는 상업용발전소 운영자로 하여금 2년에 한번 해체기금 현황을 보고하도록 하고 있으며, 영구정지 후 5년간 매년 보고하도록 하고 있다.

이에 본 논문에서는 NRC의 원전 해체 비용 평가 기초자료와 TLG Service, Inc.사의 미국 상업용 원전

의 해체비용 평가자료를 분석하여 국내 원전 해체 비용평가에 활용 적합성 및 주안점을 분석하고자 한다.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. NUREG/CR-0130<sup>[1]</sup>의 원전해체비용 평가

미국 NRC는 1970년대 말부터 1980년대 초에 원자력시설 유형별로 해체기술, 안전성 및 비용에 대한 분석 보고서를 발행하였다. 가압경수로, 비등경수로, 핵연료재처리 시설, 저준위 방사성폐기물 처분시설, 핵연료 가공 시설 및 연구로 등에 대한 다양한 연구를 수행하였다. 각각의 경우 참조원전을 설정하여 연구를 수행하였으며, 선행 원자력시설 해체 사례 분석을 통하여 해체 전략별 정의와 함께 특징을 분석하고 원자력시설의 시설 특성을 분석하였다. 가압경수로에 대해서는 미국의 Trojan 원전 (3500 MWt, 1175 MWe)을 참조로 해체 연구를 수행하였다. 가압경수로의 경우 원자로 압력용기, 원자로 냉각 계통, 격납건물, 핵연료 건물, 보조건물, 터빈 건물 등의 시설에 대한 분석을 통하여 해체 물량 산정을 하였다. 방사화 및 표면 오염에 의한 방사선원항 분석을 수행하였으며 각 해체 전략 및 제염 방법에 따라 방사성폐기물량을 산정하고 이에 따른 비용 산정 결과를 제시하였다.

방사선원항 분석시 가압경수로의 경우 40년 운영을 전제로 75%의 전출력 운전을 가정, 30 Effective Full Power Year를 기준으로 산정하였다. 방사화분석의 경우 ANISN-ORIGEN 코드의 조합으로 원자로심 및 주변 구조물의 방사화를 분석하였다. 방사화 분석 결과 주요 원자로 구조물의 총방사능량은  $1.789E+17$  Bq로 평가하였고, 영구정지 후 냉각기간에 따라 방사능 감쇄 경향을 분석하였다. 특히 콘크리트 생체차폐체의 방사화 분석에서 희토류 물질에 의한 문제점을 지적하였다. 콘크리트 성분 중 정의되지 않은 미세한 희토류 물질에 의하여 실제 측정치와 계산 결과의 차이를 제시하였으며, 콘크리트의 미량 성분 분석 또는 영구정지 후 채취시료에 대한 감마선 측정에 의하여 최종적인 정량 분석을 하는 것이 적합하다고 제시하였다.

방사화 부식생성물의 경우 원자력 시설의 유지

보수 자료를 근거로 평가하였으며, 원자로 압력용기의 경우 총 방사능량을 약 130 Ci, 증기발생기의 경우 약 4400 Ci, 가압기의 경우 약 4 Ci, RCS(Reactor Coolant System)를 제외한 배관의 경우 약 60 Ci, RCS 배관의 경우 약 160 Ci로 평가하였다. 그 외의 시설, 구조물, 기기에서의 방사선원항 평가와 함께 해체 물량 산정의 기초자료를 제시하고 있으며, 방사선량 자료 및 비용평가자료를 제시하고 있다.

가압경수로의 경우 1978년 기준으로 즉시해체의 경우 영구정지전 2년간의 준비 및 계획 단계를 포함하고 6년동안 해체를 완료하는 기준으로 \$42 million의 해체 비용이 발생하며 작업자의 피폭선량은 약 1200 man-rem으로 평가하였다. 즉시해체 비용은 다음 Table 1과 같다.

지연해체의 경우 영구정지전 2년간의 준비 및 계획 단계를 포함하고 3년동안 지연해체를 준비하는 기준으로 \$13 million의 지연 해체 준비 비용이 발생하며, 이 기간동안 작업자의 피폭선량은 약 420 man-rem으로 평가하였다. 이후 처음 10년간 연간 10 man-rem 이후 30년 또는 그 이후는 연간 14 man-rem으로 평가하였다. 지연해체의 경우 지연 기간동안 연간 관리 비용은 약 \$ 80,000로 평가하였다. 지연 해체 비용은 지연 기간에 따라 10년, 30년, 50년, 100년의 경우 지연 해체 준비 비용을 합하여 각각 \$50.2 million, \$51.8 million, \$46.8 million, \$50.8 million로 평가하였다.

Table 1. Estimated Dismantlement Costs for Reference PWR - NUREG/CR-0130

| Category                             | Cost in millions of 1978 \$ | % of Total |
|--------------------------------------|-----------------------------|------------|
| Spent Fuel Disposal                  | 2.467                       | 7.3        |
| Activated Materials Disposal         | 2.734                       | 25.6       |
| Containment Internal Disposal        | 0.961                       |            |
| Other Building Internals Disposal    | 4.222                       |            |
| Waste Disposal                       | 0.693                       |            |
| Staff Labor                          | 8.986                       | 26.7       |
| Electrical Power                     | 3.500                       | 10.4       |
| Special Equipment                    | 0.822                       | 2.4        |
| Miscellaneous Supplies               | 1.559                       | 4.6        |
| Facility Demolition(Non-radioactive) | 6.410                       | 19.0       |
| Special Contractors                  | 0.390                       | 1.2        |
| Nuclear insurance                    | 0.800                       | 2.4        |
| Environmental Surveillance           | 0.154                       | 0.5        |
| Sub total                            | 33.698                      |            |
| 25% Contingency                      | 8.425                       |            |
| Total Dismantling Cost               | 42.100                      |            |

## 2. NUREG/CR-5884<sup>[2]</sup>의 원전해체비용 평가

1988년 최종적인 해체 규정이 제정됨에 따라 NRC는 해체 신청 문서의 검토를 위한 기초자료가 필요하게 되었고 이에 따라 해체 작업, 작업자 피폭 및 비용 산정의 측면에서 기초자료를 발간하였다. 이 보고서는 1978년도의 연구보고서 NUREG/CR-0130를 바탕으로 재산정하였다. 해체 전략에 따라 즉시해체(DECON), 지연해체(SAFSTOR), 차폐격리(ENTOMB)별로 해체 공정을 분석하고 이에 따라 비용을 평가하였다. 현재 미국은 어느 방식을 선택 하더라도 원자로 운전정지 후 60년 이내에 비제한적으로 사용할 수 있도록 잔류방사능을 제거하여 시설을 개방하는 것을 의무화하고 있다. 현재 미국 상업용원자로의 경우 10CFR 50.75에 의하여 최저 재정보증액을 산정하며 10CFR50.82(a)(4)(i)에 의하여 원자로 영구정지 후 2년 이내에 NRC에 정지 후 해체 활동보고서(Post-shutdown Decommissioning Activity Report, PSDAR)를 제출해야 한다.<sup>[2]</sup> 이 PSDAR에서도 주요 내용 중의 하나로 해체활동에 대한 비용 및 기금의 보증이 요구된다<sup>[3]</sup>.

이 보고서에서는 비용평가를 위하여 30 Effective Full Power Year, 고연소도핵연료(48,000 ~ 60,000 MWD/MTU)에 대해서는 건식저장을 위해 최소 7년간 사용후핵연료 저장조에서의 냉각요건을 적용하였으며, 방사성폐기물 처분 시설에 따른 비용 편차에 대한 연구를 진행 하였다. 설정에 따라 DECON, SAFSTOR1, SAFSTOR2, ENTOMB1, ENTOMB2, ENTOMB3에 대한 비용을 평가하였다. 비용 평가를 위해 참조 가압경수로 전체의 기기, 배관, 구조물에 대한 물량 평가 및 해체, 철거 방법에 따른 단위 작업 시간 및 작업자 투입량 등의 자료 및 산정 방법을 제안하였다. 주요 철거 공정별 비용 및 작업자 피폭 평가는 다음 Table 2와 같다.

지연해체(SAFSTOR)의 경우 60년 이내의 안전저장 기간 동안 사용후핵연료를 저장조에 보관하는 것으로 설정하였으며, SAFSTOR1의 경우 압력용기와 생체차폐 콘크리트를 제외한 모든 방사성물질들을 시설 내에 보관, 냉각 후 비제한적 방출(Unrestricted release)을 하는 개념으로 평가하였으며, SAFSTOR2는 모든 방사성물질이 비제한적 방출이 불가능하

다고 설정하였고 저준위방사성폐기물의 부피감용이 없다고 가정하였다. 차폐격리(ENTOMB)의 경우 모든 방사성물질을 격납건물 내 저장 보관 하는 것으로 설정하였으며, ENTOMB1의 경우 60년 차폐격리 후 모든 물질을 비제한적 방출이 가능한 개념으로 평가하였으며, ENTOMB2는 60년 차폐격리 후 방사성물질 전량의 비제한적 방출은 불가능하다고 설정하였고 원자로 압력용기와 생체차폐체는 우선 철거하여 처분하는 것으로 가정하였다. ENTOMB3는 차폐격리기간을 60년에서 300년으로 연장하여 최종적으로 방사선 조사 없이 허가종료가 가능한 것으로 설정하여 평가를 수행하였다. 평가 결과는 다음 Table 3과 같다. 해체 비용은 1993년도 기준으로 평가하였으며 25%의 예비비를 추가하였고 토양 오염 비용은 제외하였다. 고방사화된 압력용기는 초기 철거하는 것으로 가정하였으며, 방사성폐기물은 Hanford의 U.S. Ecology facility 시설로 운반, 처분하는 것으로 가정하였다. 또한 방사성폐기물 처분시설의 선택에 따른 비용 차이를 평가하였다. Hanford site와 Barnwell 시설에 저준위방사성폐기물의 처분 비용 차이를 평가하였다.

Table 2. Estimated Costs and Radiation Doses Resulting from Dismantlement Activities

| Element                  | Cost (millions 1993\$) | Radiation dose (person-rem) |
|--------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Contaminated System      | 10.061                 | 533.36                      |
| Reactor Pressure Vessel  | 1.002                  | 17.68                       |
| Steam Generators         | 11.598                 | 60.00                       |
| RCS Piping/Components    | 1.982                  | 23.96                       |
| SNF Pool Racks           | 1.748                  | 1.20                        |
| Activated Concrete       | 1.004                  | 31.22                       |
| HVAC System              | 3.724                  | 2.59                        |
| Contaminated Surfaces    | 1.368                  | 9.92                        |
| Bridge Cranes            | 0.576                  | 0.31                        |
| Undistributed Costs      | 24.809                 | 40.10                       |
| Termination Survey       | 1.220                  | 0.00                        |
| Dry Active Waste         | 0.885                  | 0.00                        |
| Waste Water Treatment    | 1.377                  | 2.71                        |
| Cascading Costs          | 0.355                  | 0.75                        |
| Totals (w/o contingency) | 61.709                 | 728.80                      |

Table 3. Results of DECON, SAFSTOR, and ENTOMB analyses

| Shutdown alternative | Estimated cost (millions 1993\$) | Waste volume disposal(m <sup>3</sup> ) | Radiation dose (person-rem) | Post-shutdown (years) |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| DECON                | 133.3                            | 8,246                                  | 953.1                       | 8.6                   |
| SAFSTOR1             | 173.9                            | 833                                    | 318.8                       | 60                    |
| SAFSTOR2             | 237.9                            | 8,246                                  | 325.2                       | 60                    |
| ENTOMB1              | 162.1                            | 913                                    | 803                         | 60                    |
| ENTOMB2              | 164.6                            | 1,362                                  | 851.9                       | 60                    |
| ENTOMB3              | 470.4                            | 913                                    | 803                         | 300                   |

Table 4. Comparison of costs for transport and disposal of LLW resulting from DECON, SAFSTOR1, and SAFSTOR2 for two disposal sites

|           |           | Estimated costs in millions of 1993 dollars |          |                               |
|-----------|-----------|---------------------------------------------|----------|-------------------------------|
|           |           | Hanford                                     | Barnwell | Difference (Barnwell-Hanford) |
| DECON     | Transport | 5.3                                         | 13.5     | 8.2                           |
|           | Disposal  | 24.5                                        | 110.1    | 85.6                          |
|           | Total     | 29.8                                        | 123.6    | 93.8                          |
| SAFSTOR 1 | Transport | 1.7                                         | 3        | 1.3                           |
|           | Disposal  | 5.8                                         | 16.4     | 10.6                          |
|           | Total     | 7.5                                         | 19.4     | 11.9                          |
| SAFSTOR 2 | Transport | 5.3                                         | 13.5     | 8.2                           |
|           | Disposal  | 24.1                                        | 108.1    | 84                            |
|           | Total     | 29.4                                        | 121.6    | 92.2                          |

3. 10CFR50.75<sup>[4]</sup> 요건에 따른 해체 추정비용 산정

미국 10CFR50.75에서는 원전 운영자로 하여금 원전 해체를 수행함에 있어 그 소요비용을 확보하도록 하고 있다.<sup>[4]</sup> 10CFR50.75(b)(1)에서는 해체재정보증(financial assurance for decommissioning)을 수행하여야 하며 이를 위한 최소 해체추정비용은 10CFR 50.75(c)에서 제시하는 비용이상이어야 함을 밝히고 있다. 해체추정비용은 임금, 에너지, 폐기물 비용 등의 요인을 보정하여 산정할 수 있다. NRC는 1986년 기준으로 가압경수로에 대하여 3400 MWt 이상에 대하여 \$105 million, 비등경수로에 대하여 \$135 million로 산정하고 수식에 물가상승변동부분을 보정하여 산정하도록 하였다. 단 여기에는 사용후핵연료 건식저장을 위한 비용 및 부지 재이

용을 위한 비용은 포함되어 있지 않다. 가압경수로의 경우 3400 MWt 이상에 대하여 \$105 million, 1200 MWt ~ 3400 MWt에 대하여 \$75 million + 0.0088 P로 산정하도록 하고 있다. 여기서 P는 원자로 출력 레벨(MWt)이며 1200 MWt 이하인 경우는 P=1200이다. 1986년 이후의 최소재정보증액은 1986년의 값에 물가변동을 고려한 보정계수를 곱해서 구할 수가 있다. 보정계수는 0.65L + 0.13E + 0.22B 의 식으로 산출하며 L은 노동, 재료 및 서비스 비용의 보정계수, E는 에너지와 폐기물 운반비용의 보정계수, B는 방사성폐기물의 처분 비용의 보정계수이다. 각 물가변동 계수 L, E는 U.S. Department of Labor Bureau of Labor Statistics(미국 노동성 통계자료)의 통계자료를 이용해야 하며 B는 NRC 보고서 NUREG-1307, "Report on Waste Burial Charges"을 참조하여 사용하여야 한다. NUREG-1307의 경우 약 2년 주기로 개정판이 배포되고 있으며 현재 개정판 15를 사용하고 있다. NUREG-1307의 해체 비용 산정에서도 현재 가치의 최소 해체추정비용은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$\text{Estimated Cost (Year X)} = [1986\$ \text{ Cost}] \times (A \times L_x + B \times E_x + C \times B_x) \quad (1)$$

여기서 (A\*Lx + B\*Ex + C\*Bx)은 위 식(1)에 해당하며 여기서 A는 1986년 해체 비용 산정에서 노동, 재료 및 서비스 비용의 구성비, B는 에너지와 폐기물 운반비용의 구성비 C는 방사성 폐기물의 처분비용의 구성비이다. NUREG-1307 보고서에 의하면 각 비용의 구성은 다음 Table 5와 같다.

주기적 해체 기금 현황 보고서의 경우 최소 해체 추정비용을 산정하고 현 상황의 기금적립현황 및 부지별 해체비용평가를 포함하고 있다. 2014년 12월, 미국 Entergy Nuclear Operations Inc.사의 비등경수로형인 Vermont Yankee Nuclear Power Station에 대한 해체기금 현황 보고에 의하면 10CFR50.75의 적용을 위한 보정계수는 2014년 Region 1 지역에 대한 미국 노동성 통계자료를 사용하였으며, 방사성폐기물 처분의 보정계수는 NUREG-1307 rev.15를 활용하였다. 1986년 기준으로 비등경수로형(BWR) 최소 해체추정비용은 \$121,208,000이며 이를 물가

변동을 보정하였다. 통계자료에 따르면 L은 2.65, E는 2.56, B는 14.160이다. 총 보정계수는 5.17026이며 이를 1986년 비용에 곱하여 \$626,676,406을 산정하였다. 10CFR50.75에 의한 최소 해체추정비용은 사후핵연료 관리와 부지 재이용 등의 비용을 합하여 \$817.22 million이고 2014년 10월 31일 현재 해체 기금 총액은 \$654.96 million 이라고 밝히고 있다.<sup>[6]</sup>

다음 Table 6은 미국의 주기적 해체기금 보고서에서의 최소 해체추정비용과 원전별 해체비용 평가 자료와의 비교이다.<sup>[7]</sup> 해체추정비용의 경우 발전용량에 따라 그 비용이 산정됨에 비해 원전별 해체비용 평가는 원전 운전 이력과 방사선원형 및 해체 전략에 따라 그 비용 평가 결과의 편차가 발생한다. 경우에 따라 \$ 1,000 million 정도의 비용 평가가 보고되고 있음을 알 수 있다.

Table 5. Evaluation of the Coefficients A, B, and C

| Cost Category     | Reference PWR Values | Reference BWR Values |
|-------------------|----------------------|----------------------|
|                   | millions 1986\$      | millions 1986\$      |
| Labor             | 17.98                | 35.12                |
| Equipment         | 1.64                 | 4.03                 |
| Supplies          | 3.12                 | 3.71                 |
| Contractor        | 12.9                 | 21.1                 |
| Insurance         | 1.9                  | 1.9                  |
| Containers        | 10.9                 | 8.14                 |
| Added Staff       | 7.5                  | 4.4                  |
| Added Supplies    | 1.2                  | 0.2                  |
| Spec. Contractor  | 0.78                 | 0.71                 |
| Pre-engineering   | 7.4                  | 7.4                  |
| Post-TMI-backfits | 0.9                  | 0.1                  |
| Surveillance      | 0.31                 | --                   |
| Fees              | 0.14                 | 0.14                 |
| Subtotal          | 66.67                | 86.95                |
|                   | A=0.64               | A=0.66               |
| Energy            | 8.31                 | 8.84                 |
| Transportation    | 6.08                 | 7.54                 |
| Subtotal          | 14.39                | 16.38                |
|                   | B=0.14               | B=0.12               |
| Burial            | 22.48                | 29.98                |
|                   | C=0.22               | C=0.22               |
| Total             | 103.54               | 133.31               |

Table 6. USA Decommissioning Funding Status

| Plant Name                                    | Type | MWt  | NRC Minimum Formula |               |
|-----------------------------------------------|------|------|---------------------|---------------|
|                                               |      |      | 2013                | 2015          |
| Arnold (Duane) Energy Center                  | BWR  | 1912 | \$610,877,551       | \$610,013,140 |
| Braidwood Station, Unit 1                     | PWR  | 3586 | \$521,778,396       | \$780,166,000 |
| Braidwood Station, Unit 2                     | PWR  | 3586 | \$521,778,396       | \$849,702,000 |
| Byron Station, Unit 1                         | PWR  | 3586 | \$521,778,396       | \$780,504,000 |
| Byron Station, Unit 2                         | PWR  | 3586 | \$521,778,396       | \$839,566,000 |
| Callaway Plant                                | PWR  | 3565 | \$521,778,396       | \$521,654,470 |
| Calvert Cliffs Nuclear Power Plant, Unit 1    | PWR  | 2737 | \$487,346,187       | \$485,981,251 |
| Calvert Cliffs Nuclear Power Plant, Unit 2    | PWR  | 2737 | \$487,346,187       | \$485,981,251 |
| Clinton Power Station                         | PWR  | 3473 | \$680,388,006       | \$996,672,000 |
| Crystal River Nuclear Plant, Unit 3           | PWR  | 2609 | \$481,806,061       | \$873,398,263 |
| Diablo Canyon Nuclear Power Plant, Unit 1     | PWR  | 3411 | \$521,602,311       | \$523,105,465 |
| Diablo Canyon Nuclear Power Plant, Unit 2     | PWR  | 3411 | \$521,602,311       | \$523,105,465 |
| Fort Calhoun Station                          | PWR  | 1500 | \$438,293,852       | \$438,189,755 |
| Ginna (Robert E.) Nuclear Power Plant         | PWR  | 1775 | \$458,325,698       | \$459,571,157 |
| Hope Creek Nuclear Power Station              | BWR  | 3840 | \$673,518,936       | \$673,038,790 |
| Indian Point, Unit 2                          | PWR  | 3216 | \$522,460,949       | \$523,880,691 |
| LaSalle County Station, Unit 1                | BWR  | 3489 | \$680,388,006       | \$910,428,000 |
| LaSalle County Station, Unit 2                | BWR  | 3489 | \$680,388,006       | \$954,631,000 |
| Nine Mile Point Nuclear Station, Unit 1       | BWR  | 1850 | \$618,724,467       | \$619,664,616 |
| Nine Mile Point Nuclear Station, Unit 2       | BWR  | 3988 | \$692,314,986       | \$693,366,955 |
| San Onofre Nuclear Generating Station, Unit 2 | PWR  | 3438 | \$521,602,311       | \$939,400,000 |
| San Onofre Nuclear Generating Station, Unit 3 | PWR  | 3438 | \$521,602,311       | \$983,500,000 |
| St. Lucie Plant, Unit 1                       | PWR  | 3020 | \$499,595,060       | \$499,838,310 |
| St. Lucie Plant, Unit 2                       | PWR  | 3020 | \$499,595,060       | \$499,838,310 |

#### 4. TLG Service, Inc.의 원전해체비용 평가<sup>[8-13]</sup>

앞에서 서술한 바와 같이 TLG Service, Inc.는 해체비용 평가 초기서부터 방법론 개발 및 기초 자료 생산과 더불어 미국뿐만 아니라 유럽의 다양한 원전의 해체 비용을 평가하였다. 미국 TLG Service, Inc 사는 AIF/NESP-036의 연구 결과를 참조로 단위 비용인자, 작업난이도 인자 등을 설정하여 해체비용 평가에 적용하였다.

미국 Wolf Creek 원전은 Kansas에 위치한 원전으로서 원자로 형태는 가압경수로이며 원자로 공급자는 Westinghouse사 이다. 설비용량은 1,250 MWe/3565 MWth 1기이다. 1호기의 경우 1985년 상업운전을 시작하였다. 미국 TLG Service, Inc.의 2008년도 Wolf Creek 원전해체비용 평가의 사례는 다음과 같다.

Wolf Creek 원전해체비용 평가에서의 사용후핵연료 관리 방안은 운전정지 후 5년 반이 지난 뒤 전량 DOE(Department of Energy)의 고준위 처분장으로 운반하는 것으로 가정하였다. 그 과정에서 사용후핵연료의 중간저장은 핵연료건물의 사용후핵연료 저장조를 활용하는 것으로 가정하여 평가하였다.

사용후핵연료 관리에서의 주요 가정으로는 인건비를 제외한 연간 유지보수 비용으로 941,000 \$를 가정하였으며 사용후핵연료 저장소에서 DOE 운반설비의 이동에 소요되는 비용을 220,000 \$로 산정하였다. 이 때 사용하는 DOE cask는 overpack을 고려한 Multi purpose canister로 평가하였다. 주요 기기에 있어서 원자로 압력용기와 내부 구조물의 경우 절단하여 처분을 위한 차폐 작업을 수행하는 것으로 설정하였으며 재사용 가능한 운반 cask를 사용한다. 절단 작업은 Refueling canal에서 수행하며 회전 및 원격 조정 절단장치를 사용한다. 미국의 경우 원자로 압력용기의 원형 처분이 가능 하나 Wolf Creek 원전에서는 최종처분장의 불확실성 및 운반과정에서의 차폐 요소 등을 고려하여 절단 공정으로 비용평가를 수행하였다.

즉시해체의 경우, 1차 계통 설비 중 원자로 냉각 계통 설비는 해체 이전에 화학적 제염을 수행하는 것으로 평가하였다. ALARA 요건에 부합하기 위하

여 제염을 선행하는 설정을 취하였으며 운전정지 후 수년 이내에 해체를 수행하는 것으로 가정하였다. 이 때 평균 제염 계수는 10으로 가정하였다. 지연 해체의 경우 지연으로 인한 방사성 물질 감소 효과가 즉시해체의 제염과 동일하다고 가정하고 화학적 제염 공정을 제외하였다. 대표적인 대형해체 폐기물 중 하나인 증기발생기의 경우 계통에 연결된 배관류를 제거한 후 원형상태로 격납건물에서 인출 후 multi-wheeled vehicle을 이용 부지 내 처리 및 저장 시설로 운반하여 처리하도록 설정하였다. 증기발생기는 상부돔과 재활용을 고려한 저오염 내부 구조물을 분리하며 상대적으로 오염이 심한 세관류는 저밀도 콘크리트로 내부를 밀봉, 오염 확산 방지 처리를 한 후 직접 처분하도록 설정하였다.

Wolf Creek 원전의 즉시 및 지연해체의 비용평가 결과는 다음과 같이 제시되고 있다. 즉시해체의 경우 허가종료에 약 85.1%, 사용후핵연료관리에 6.3% 부지복원에 8.5%의 비용이 평가되었다. 지연해체의 경우 허가종료에 약 84.7%, 사용후핵연료관리에 9.3% 부지복원에 6.0%의 비용이 평가되었다. Wolf Creek 원전의 해체 비용평가 결과, 지연해체의 경우 해체폐기물의 처리 및 처분 비용에서의 이득을 확보할 수 있었으며 반대로 사용후핵연료 저장조 관리를 포함한 사업관리비용에서의 비용 증가가 발생하였다. 이를 통하여 부지 및 시설의 물리적 방호를 포함한 사업관리 비용과 사용후핵연료의 중간저장 또는 처분 계획과의 비교 평가의 필요성을 알 수 있다. 다음 table 7에 즉시해체와 지연해체의 2011년 기준 해체 비용을 비교하였다.<sup>[8,9]</sup>

TLG Service, Inc.가 수행한 미국 원전 해체 비용 평가의 경우 초기에는 주로 해체 전략별 비용을 비교 평가하였고 운영허가 만료시점에 근접함에 따라 또는 정지 후 해체 활동보고서(PSDAR) 제출 시점에 원전별로 구체적인 해체전략을 수립하여 비용을 평가하였다. 2011년 기준으로 가압경수로형 원자로의 전략별 비용 평가를 비교하였으며, Crystal River 3(860 MWe, PWR) 원전과 Callaway(1,190 MWe, PWR) 원전에 대한 비교는 다음 Table 8, 9와 같다. 지연해체의 경우 영구정지 후 운영종료허가까지의 원전의 관리 비용의 누적으로 인하여 즉시해체

에 비하여 총 해체비용이 증가함을 알 수 있다.<sup>[10-13]</sup>

Table 7. Results of DECON and SAFSTOR analyses of Wolf Creek

| Cost Element                           | DECON cost<br>2011\$ thousands |        | SAFSTOR cost<br>2011\$ thousands |        |
|----------------------------------------|--------------------------------|--------|----------------------------------|--------|
|                                        | Total                          | %      | Total                            | %      |
| Decontamination                        | 14,403                         | 2.3%   | 12,732                           | 1.4%   |
| Removal                                | 103,023                        | 16.3%  | 105,395                          | 11.9%  |
| Packaging                              | 22,742                         | 3.6%   | 17,149                           | 1.9%   |
| Transportation                         | 10,359                         | 1.6%   | 7,627                            | 0.9%   |
| Waste Disposal                         | 61,457                         | 9.8%   | 42,983                           | 4.9%   |
| Off-site Waste Processing              | 23,110                         | 3.7%   | 25,197                           | 2.8%   |
| Program Management                     | 245,392                        | 38.9%  | 330,000                          | 37.3%  |
| Security                               | 47,017                         | 7.5%   | 163,895                          | 18.5%  |
| Spent Fuel Pool Isolation              | 11,822                         | 1.9%   | 11,822                           | 1.3%   |
| Spent Fuel Management - Direct Costs   | 39,421                         | 6.3%   | 39,421                           | 4.5%   |
| Insurance and Regulatory Fees          | 11,946                         | 1.9%   | 53,656                           | 6.1%   |
| Energy                                 | 7,145                          | 1.1%   | 14,778                           | 1.7%   |
| Characterization and Licensing Surveys | 13,053                         | 2.1%   | 14,225                           | 1.6%   |
| Property Taxes                         | 10,411                         | 1.7%   | 20,459                           | 2.3%   |
| Corporate Allocations                  | 1,883                          | 0.3%   | 3,093                            | 0.3%   |
| Miscellaneous Equipment                | 6,952                          | 1.1%   | 22,245                           | 2.5%   |
| Total                                  | 630,135                        | 100.0% | 884,677                          | 100.0% |

Table 8. Decommissioning Cost Elements of Crystal River 3

| Cost Category         | DECON cost                   |               | SAFSTOR cost                 |               |
|-----------------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
|                       | Total<br>Thousands<br>2008\$ | % of<br>Total | Total<br>Thousands<br>2013\$ | % of<br>Total |
| License Termination   | -                            | -             | 861,902                      | 73.0          |
| Spent Fuel Management | -                            | -             | 265,505                      | 22.5          |
| Site Restoration      | -                            | -             | 52,721                       | 4.5           |
| Total                 | -                            | -             | 1,180,128                    | 100.0         |

Table 9. Decommissioning Cost Elements of Callaway

| Cost Category         | DECON cost                   |               | SAFSTOR cost                 |               |
|-----------------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
|                       | Total<br>Thousands<br>2011\$ | % of<br>Total | Total<br>Thousands<br>2011\$ | % of<br>Total |
| License Termination   | 617,324                      | 81.8          | 849,173                      | 82.7          |
| Spent Fuel Management | 33,726                       | 4.5           | 73,749                       | 7.2           |
| Site Restoration      | 103,448                      | 13.7          | 103,462                      | 10.1          |
| Total                 | 754,498                      | 100.0         | 1,026,384                    | 100.0         |

### III. CONCLUSION

미국의 원전 해체 비용 평가의 기초자료로 활용하고 있는 NUREG/CR-0130과 NUREG/CR-5884의 경우 미국의 가압경수로형 Trojan 원전(3500 MWt, 1175 MWe)을 참조로 해체 연구를 수행하였다. 이 보고서에서는 설계자료를 바탕으로 원전 내 각 건물 및 기기의 물량을 산정하는 방법론을 수립하여 해체 대상 물량을 산정하였다. 또한 초기 선원항 자료를 분석하고 해체제염과정에서 발생하는 방사성폐기물량을 산정하였다. 이러한 분석 자료는 국내 원전의 해체 비용평가의 기초자료로 매우 중요하다. 참조 모델로서 국내 원전 특성 자료와 함께 현재의 가용한 해체 제염 기술의 특성에 따라 재분석을 수행하면 국내 원전 해체 비용 평가의 기초자료로 충분히 사용 가능하다고 판단된다. 특히 AIF/NESP-036 보고서에서는 단위비용인자를 구축하기 위한 각 기기별 해체 제염 작업 공정의 기술과 함께 작업 시간 및 필요 작업 인력에 대한 자료를 구축하였다. 단위비용인자의 개념은 현재 미국 뿐만 아니라 유럽 및 IAEA의 해체 비용평가에서의 기본 개념으로 활용되고 있다. 이러한 자료를 바탕으로 국내 물가정보자료 및 건설품셈 등의 자료를 활용하면 국내 원전 해체 비용 평가에 있어 충분한 적용성을 확보할 수 있을 것이다. 이러한 기초 평가 결과 기본적으로 지연해체는 지연 기간 동안 원전의 관리 비용 증가로 인하여 즉시해체보다 더 많은 비용이 소요되는 것으로 평가되었다. NRC의 해체 비용 관련 규정에 의하면 각 원전은 해체 비용 산정시 물가변동을 고려해야 한다. NRC가 요구하

는 최소 해체추정비용의 경우 해체전략 및 원전 특성자료를 반영할 수 없으나 NRC의 해체기금 분석 보고에 의하면 대부분의 원전이 NRC가 요구하는 최소 해체추정비용 및 원전별 해체 비용 평가에 충분한 기금을 적립하고 있음을 알 수 있다.

미국의 경우 TLG Service, Inc.사가 초기 해체 비용연구 참여로부터 현재까지 상당량의 원전 해체 비용 평가를 수행하고 있다. TLG Service, Inc.사가 수행한 원전해체비용평가 자료의 경우 초기에는 즉시해체와 지연해체의 시나리오별 비용평가를 수행하며 원전별로 적합한 해체전략이 수립된 후 좀 더 구체적인 비용평가를 수행하고 있다. TLG Service, Inc.사의 비용평가의 경우, 단위비용인자를 통하여 주요기기의 해체비용을 평가하고 있으며, 각 원전 소재지역별 물가 통계자료와 AIF/NESP-036 보고서에서의 단위비용평가방법론 및 해체비용 평가체계를 이용하고 있다. 각 원전의 비용평가 자료를 보면 각 지역별 물가통계자료에 의해 단위비용간의 차이가 발생하며 특히 노무비의 비중이 큼을 알 수 있다.

해체비용을 크게 3개의 범주, 운영허가종료, 사용후핵연료관리, 부지복원으로 구분할 경우 전체비용에 있어 운영허가종료가 제일 큰 비중을 차지하며 사용후핵연료관리, 부지복원 순으로 평가되었다. 즉시해체의 경우 지연해체에 비해 사용후핵연료관리 비용이 증가하였으며 지연해체의 경우 운영허가종료의 비용이 증가하였다. 해체시 발생하는 방사성폐기물의 경우 구체적인 해체 전략, 제염 기술 등에 따라 약간의 차이가 발생할 수 있지만 전반적으로 즉시해체에 비해 지연해체의 경우가 뚜렷하게 이득이 보이지 않고 있다. 천층 처분 대상의 Class A,B 의 경우에서 약간의 폐기물량 감소를 확인할 수 있다.

부지특성별 원전해체비용평가에 있어서 미국의 원전들은 NRC 요건의 최소해체추정비용 이상의 부지특성별 비용을 평가 기금을 준비하고 있음을 알 수 있다. San Onofre Nuclear Generating Station 원전의 경우 부지 제약 상황, 방사성폐기물 처리, 사용후핵연료 관리, 부지 오염 상황 및 부지복원조건 등에 따라 비용의 변화가 크게 발생함을 알 수

있다. 국내 원전 해체 비용 평가시에도 이러한 부지 조건에 따른 평가를 고려해야할 필요가 있다고 판단된다. 또한 국내의 경우 IAEA의 권고사항을 적용하여 방사성폐기물 분류체계를 재정비하였다. 이는 현재 미국의 분류체계와는 일부 다르다. 이에 따라 해체시 발생하는 방사성폐기물 물량 산정시, 선행 미국 원전해체 자료를 신분류체계에 적합하게 활용하기 위한 방법을 개발해야할 필요가 있다. 특히 자체처분 대상폐기물 평가 방법론 설정은 해체비용의 정확성을 확보하는 중요한 인자로 작용할 것이다. 또한 국내 원전해체 비용 평가를 위하여 시설 특성과 작업 특성에 적용할 수 있는 정보 자료 구축이 필요하다.

### Acknowledgement

본 연구는 원자력안전위원회에서 주관하는 원자력안전 연구사업의 일환으로 수행된 연구입니다.

### Reference

- [1] R.I. Smith, G J. Konzek, and W.E. Kennedy, Jr., "Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Pressurized-Water Reactor Power Station", NUREG/CR-0130 (Prepared for the U.S. NRC by Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington), 1978. 6 (Addendum 1, July 1979; Addendum 2, July 1983; Addendum 3, September 1984; Addendum 4, July 1988)
- [2] G.J. Konzek et al., "Revised Analyses of Decommissioning for the Reference Pressurized-Water Reactor Power Station", NUREG/CR-5884 (Prepared for the U.S. NRC by Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington), 1995. 11
- [3] U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Decommissioning of Nuclear Power Reactor", Regulatory Guide 1.184, 2013. 8
- [4] U.S. Code of Federal Regulations 10CFR50.75, "Reporting and recordkeeping for decommissioning planning", Office of the Federal Register National Archives and Records Administration
- [5] U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Report on Waste Disposal Charges: Changes in Decommissioning Waste Disposal Costs at Low-Level Waste Burial Facilities", NUREG-1307, Revision 15, 2013. 1
- [6] Energy Nuclear Operations, Inc., "Update to



---

Decommissioning Funding Status Report Vermont Yankee Nuclear Power Station”, BVY14-082, 2014. 12

- [7] U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Summary Findings Resulting from the Staff Review of the 2015 Decommissioning Funding Status Reports for Operating Power Reactor Licensees”, SECY-15-0122, 2015. 09
- [8] TLG Services Inc., “Decommissioning Cost Analysis for the Wolf Creek Generating Station”, W11-1598-002, Rev. 0 , 2008. 8
- [9] TLG Services Inc., “Decommissioning Cost Analysis for the Wolf Creek Generating Station”, W11-1642-001, Rev. 0 , 2011. 8
- [10] TLG Services Inc., “Decommissioning Cost Analysis for the Crystal River Nuclear Plant Unit 3”, P23-1697-002, Rev. 0, 2008. 10
- [11] TLG Services Inc., “Decommissioning Cost Analysis for the Crystal River Unit 3 Nuclear Generating Plant”, P23-1680-001, Rev. 0, 2013. 12
- [12] TLG Services, Inc. “Decommissioning Cost Analysis for the Callaway Plant”, A22-1599-002, Rev. 0, 2008. 8
- [13] TLG Services Inc., “Decommissioning Cost Analysis for the Callaway Energy Center”, A22-1644-001, Rev. 0, 2011. 8
- [14] ENERGY SOLUTIONS, “2014 Decommissioning Cost Analysis of the San Onofre Nuclear Generating Station Unit 2&3”, Document No. 164001-DCE-001

## 미국의 원전해체 비용평가 기초자료 및 동향 분석

신상화,<sup>1\*</sup> 김순영<sup>2</sup>

<sup>1</sup>부산가톨릭대학교 방사선학과

<sup>2</sup>(주)레드코어

### 요 약

원전의 안전한 해체 관리를 위해 원전 해체 비용 평가는 매우 중요하다. 가장 많은 원전 해체 경험을 갖고 있는 미국의 경우 1970년대부터 원자력시설의 해체를 위하여 비용평가 연구를 진행하였다. 미국 NRC는 다양한 로형 및 원자력시설에 대한 해체 기술, 안전성 및 비용에 대한 연구를 수행하였다. 전체 해체 비용에서 운영허가종료비용이 가장 큰 비중을 차지하며, 그 다음으로는 사용후핵연료 관리, 부지복원순으로 평가되었다. 해체비용은 전체비용에 있어 운영허가종료가 제일 큰 비중을 차지하며 사용후핵연료관리, 부지복원 순으로 평가되었다. 즉시해체의 경우 지연해체에 비해 사용후핵연료관리 비용이 증가하였으며 지연해체의 경우 운영허가종료의 비용이 증가하였다. 전반적으로 즉시해체에 비해 지연해체의 경우가 뚜렷하게 이득이 보이지 않고 있다. 국내 원전 해체 비용 평가시 부지 조건에 따른 평가를 고려해야할 필요가 있다고 판단된다. 또한 국내의 경우 IAEA의 권고사항을 적용하여 방사성폐기물 분류체계를 재정비하였다. 이에 따라 해체시 발생하는 방사성폐기물 물량 산정시, 선행 미국 원전해체 자료를 신분류체계에 적합하게 활용하기 위한 방법을 개발해야할 필요가 있다. 특히 자체처분 대상폐기물 평가 방법론 설정은 해체비용의 정확성을 확보하는 중요한 인자로 작용할 것이다. 또한 국내 원전해체 비용 평가를 위하여 시설 특성과 작업 특성에 적용할 수 있는 정보자료 구축이 필요하다.

중심단어: 원자력발전소, 방사성폐기물, 해체, 비용평가