

## 연구로 가상 해체 시설 설계

### Design of a virtual dismantling facility for research reactor

박희성, 김성균, 이근우, 오원진, 박진호

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### 요 약

가상의 연구로 해체 시설 환경을 설계하는데 필요한 단위 프로그램들의 특성을 검토한 후 결과 자료를 바탕으로 해체 디지털 목업 시스템의 설계가 완료되었다. 단위 프로그램들은 해체 데이터베이스 시스템 모듈, 연구로 시설과 제염 및 해체 장비를 3차원으로 모델링하는 모듈, 3차원으로 방사능 오염 분포도를 묘사하는 모듈, 그리고 해체 일정 및 해체 비용을 평가하는 모듈 등으로 구분된다. 독립적으로 운영되는 이들 단위 모듈들을 통합된 시스템으로 만들기 위해 단위 모듈들의 아키텍처 설계 연구가 수행되었다.

연구 결과 다양한 모듈들로 구성된 해체 디지털 목업 시스템을 통합된 환경에서 시나리오를 시험 평가할 수 있도록 하기위해 연구로 시설의 제염 및 해체 활동을 시각적으로 보여줄 수 있는 가시화(visualization) 모듈과 해체 일정 및 해체 비용을 평가하고 분석하는 시뮬레이션(simulation) 모듈로 해체 디지털 목업 시스템의 아키텍처를 구현하였다.

#### Abstract

A design of a dismantling mock-up system have been established based on the result that analyzed a characteristic of modules which need to design a virtual dismantling facility. A unit program composed of a various module such as a decommissioning database system, 3D dosimetric mapping that represents a distribution of a radionuclide contamination, a evaluation module for a dismantling schedule and cost. A research of software architecture was carried out in order to integrate these components that have been independently operated.

The result was established an architecture that consist of a visualization module which could be visualized D&D activities and a simulation module which can be evaluated a dismantling schedule and decommissioning cost.

#### 1. 서론

서울 공릉에 위치한 연구용 원자로 2호기(TRIGA Mark III, 2MW in 1972년) 해체가 2000년 6월에 시작하여 현재까지 진행되고 있다[1]. 방사능에 오염된 지역에서의 해체활동으로부터 작업자

의 안전성 확보와 해체 폐기물의 감량 그리고 해체 비용을 평가하기 위해 해체 정보 통합관리 시스템 과제가 수립되어 연구가 진행되고 있다. 원자력 선진국의 경우 원자력 시설의 해체에 작업자의 안전성과 해체 폐기물과 같은 경제성 문제[2]를 최적화시키기 위한 수단으로 컴퓨터를 활용한 외부 피폭선량 평가 시스템[3, 4]이나 해체 비용 평가 시스템[5, 6] 개발에 노력을 기울이고 있는 추세다. 디지털 목업 시스템이란 물리적인 목업 시스템 대신에 3D CAD와 VRML 및 JAVA 3D API와 같은 소프트웨어를 이용하여 현실세계와 똑 같은 상황을 컴퓨터상에서 해체 활동을 가상으로 연출하여 해체가 수행되기 전에 해체 일정과 해체 폐기물량 그리고 해체 비용 등을 예측하는 시스템이다.

가상의 해체 현장을 구현시키기 위해서는 가장 먼저 3D CAD로 해체 시설물을 모델링 한 후 방사능에 오염된 위치와 분포를 확인 시킬 필요가 있다. 정확한 방사능 값을 얻기 위해서는 원자력 시설의 운전이력과 상세 도면 및 기타 자료들이 지원되어야 하는데, 수명이 오래된 원자력 시설들의 자료 부재는 제염 해체 계획을 수립하는데 장애 요인이 된다. 재래식 방식으로 제염 해체를 하게 되면 작업자들은 방사선 피폭과 다른 위험에 노출되게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 여러 종류의 소프트웨어를 사용하여 해체 시설 내부를 3차원으로 모델링하는 기술과 3D CAD를 포함한 가상현실 기술이 개발되고 있다[7]. 또한 상업용 원자로 해체 경험이 있는 선진국에서는 가상현실 기술[8, 9]과 Dose assessment와 human motion simulation 을 결합한 3차원 Simulation tool을 개발하여 원자력 시설의 제염 해체에 ALARA 문제를 평가[10, 11]하고 있으며, 이 시스템은 원자력 시설 중 핫셀 해체에 적용되고 있다[12]. 해체 일정과 해체 비용을 정성적으로 평가하기 위해서는 작업자수와 해체 시간 및 해체 폐기물량을 평가할 수 있는 평가식과 가중치(weighting factor)에 대한 정의[13]가 선행되어야 한다. 국내의 경우 원자력 시설에 대한 해체 경험이 없는 관계로 상업용 발전소를 해체한 결과 자료를 확보하여 연구로 해체에 사용할 수 있는지에 대한 타당성 검토를 진행하고 있는 중이다. 물리적인 목업 시설을 컴퓨터 기술을 이용하여 가상으로 설계한 후 해체 일정과 해체 비용 등을 평가하기 위해 독립적으로 운영되는 각 단위 모듈들의 특성을 검토하였으며, 해체 디지털 목업 시스템이 필요로 하는 구성 요소 및 요구 조건들을 분석함으로써 시스템의 아키텍처 설계를 완료하였다.

## 2. 해체 디지털 목업 구성요소 선정

고방사능에 오염된 원자력 시설물의 해체 활동에서 가장 중요한 사항은 작업자의 피폭으로부터의 보호와 해체 비용을 절감하는데 있다. 해체 준비 작업부터 해체 후 처리까지 가상의 해체 환경에서 해체 활동의 예측에 필요한 기능들을 요소별로 검토 분석하였다.

### 가. 해체 정보인자 도출

연구로 해체 활동 준비 작업부터 제염 및 절단 그리고 해체 후 처리 작업의 전 과정에서 해체 작업자, 해체 소요시간, 해체 폐기물량과 해체 비용 등에 영향을 미치는 변수들을 조사하기 위해 해체 작업자 정보와 방사선 및 방사능 정보 그리고 해체 폐기물 정보 등을 검토[14]하였으며, 방사선에 조사된 해체 시설물들 중 연구로 2호기의 콘크리트 차폐체와 노심 및 Thermal column에 대한 해체 결과자료를 분석하였다[15].

#### 나. 해체 시설물 3차원 설계

디지털 목업 시스템은 컴퓨터상에서 해체 활동을 실험하기 때문에 가장 먼저 해체 시설물을 입체적으로 설계되어야 한다. 원자력 시설 및 부품들의 설계와 모델링 도구로는 여러 상업용 소프트웨어들이 있으나 해체 준비 작업부터 제염 및 해체 과정 그리고 해체 후 처리 과정 등 복잡한 단계를 효과적으로 가시화 시킬 수 있는 기능을 가진 제품이 선정되어야 한다. 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 제품으로는 AutoCAD와 3D MAX 그리고 CATIA 및 VRML 제품 등이 있다.

#### 다. 해체 시설물의 제원 및 방사능 정보

해체 디지털 목업 시스템은 방사능에 오염된 시설물을 해체 및 절단 하면서 발생하는 현상들을 평가하는 것이기 때문에 3차원으로 설계된 해체 시설물의 형상에 제원 및 방사선에 조사된 이력과 관련한 데이터들이 필요하다. 해체 시설물의 두께 및 크기와 재질 그리고 방사능 정보 등은 연구용 원자로 해체 활동으로부터 발생된 자료들을 저장 관리하고 있는 해체 데이터베이스 시스템으로부터 해당 데이터들을 인출하여 사용한다. 해체 디지털 목업 시스템에서 콘크리트 차폐체에 대하여 해체 공정을 가시화하고 시뮬레이션 하기 위해서는 먼저 해체 데이터베이스에 접속해서 시설 정보 내 콘크리트 차폐체와 관련된 테이블을 찾아 해당 제원 값을 가져올 수 있도록 프로그램을 해야 한다.

#### 라. 방사선/능 분포-3차원 매핑

연구로 및 원자력발전소 해체에 필수적으로 요구되는 것이 방사화 및 표면오염 방사능 재고량 평가이다. 방사능 재고량 계산은 해체를 수행하면서 발생하는 방사능량을 예측하여 해체 작업환경의 안전성을 높이기 위한 수단으로서 그 목적이 중요하다고 볼 수 있다. 중성자에 조사된 해체 대상 시설물의 방사성 핵종농도와 방사능 및 이로 인한 감마 선량은 대상 구성물질에 대한 중성자 방사화 계산으로부터 추정할 수 있다. 방사능 재고량 산정은 원자로 운전기간에 걸친 방사성 핵종의 생성과 소멸을 포함하여 많은 종류의 방사성핵종을 계산할 수 있는 ORIGEN2 코드와 계산된 방사능 자료를 활용하여 수송 이론을 이용한 ANISN나 DOT/ DORT 혹은 TORT 코드 그리고 MicroShield와 같은 점 선원 코드를 이용하여 계산할 수 있다[16]. 그러나 이들 코드들은 기하학적 모델링의 한계와 핵단면적과 선원항의 균정수화 등에서 발생하는 코드 고유의 불확실성을 포함하고 있어 콘크리트 차폐체 심층부에 존재하는 선원항을 계산하기는 어려운 현실이다. 최근에는 감마 카메라를 이용하여 오염된 시설물에 존재하는 방사선을 측정하는 기술이 개발[17]되고 있지만 콘크리트 차폐체 내부의 농도를 판별하지는 못하고 있다. 본 연구에서는 콘크리트 차폐체 내부의 방사능 재고량을 코어 드릴링 머신으로 채취한 샘플링한 값으로 대신하여 3차원으로 입체화 하였다.

#### 마. 해체 일정 평가 방법론

해체 일정과 직접 관련된 해체 작업자 수, 해체 장비 및 작업 시간 그리고 해체 폐기물량을 정확히 예측하기 위해서는 해체 단위 작업별 난이도와 복잡도가 포함된 수학적 함수식 및 가중치 등이 고려되어야 한다. 국내의 경우 아직 연구로 및 원자력 시설 해체와 관련한 단위 작업별 평가식과 가중치 값이 없기 때문에 원자력 시설 해체 시 일반적으로 통용되는 해체 절차를 적용한 후 해체 단위 작업별로 인공수(작업자 \* 시간)를 구할 수 있도록 하였다. 해체 DMU 시스템에서는 향후 원자력 관련 시설 해체 시 해체 일정 방법을 적용시키기 위해 해체 단위 작업의 범위를 크게 전처리 작업과 해체 작업 그리고 후처리 작업으로 구분 하였다. 해체 일정 평가에 기초가 되는 가중치(weighting factor) 값은 작업의 위치와 방사능 정도 및 작업자의 작업조건에 해당하는 respiratory protection와 protecting clothing 그리고 작업 간 휴식 시간 등이 선정되었다.

### 3. 결과 및 고찰

해체 활동으로부터 생산된 여러 자료를 통하여 해체 정보 주요 인자들을 검토한 결과에 따라 해체 일정 및 해체 폐기물량과 해체 비용을 평가하는데 필요한 항목들을 다음과 같이 도출하였다.

- o 연구로 시설에 존재하는 공간선량
- o 방사능 재고량: 방사능량 및 비 방사능량
- o 제염 공정;
  - 초기 제염 핵종 및 농도, 제염 장비, 제염 작업자 수, 제염 시간, 제염 후 농도
- o 제염 결과 0.4 Bq/g을 기준하여 방사능량과 비 방사능량 재평가
- o 해체 공정;
  - 해체장비, 장비 설치 시간
  - 대상물 절단 및 세단 시간
  - 절단 길이 및 부피

#### 가. 시스템 설계 기준

- ① 해체 시설물들의 속성과 기능들을 2D 혹은 3D로 가시화하여 해체 현장과 동일하게 설계되어 물리적인 목업 시설을 대신할 수 있는 기능을 갖추어야 한다.
- ② 고방사능에 오염된 해체 공간을 3D CAD 및 가상현실(VRML)기법을 응용하여 모델링되어야 한다.
- ③ 오염된 해체 대상물에 대한 방사능 재고량 산출 및 농도별 분포를 그래픽으로 설계되어 해체 계획 수립 시 참고가 될 수 있도록 해야 한다.
- ④ 해체 작업자 수와 해체 소요 시간, 해체 폐기물량과 작업자의 피폭량을 시뮬레이션을 통하여 사전에 예측하기 위해서는 해체 단위 작업별 난이도와 복잡도 등이 포함된 산술식과 가중치 값이 먼저 정의되어야 한다.

#### 나. 시스템 설계 요구조건

- ① 해체 활동에 관계하는 엔지니어와 작업자들이 시스템에 쉽게 접근할 수 있고, 사용하기 용이하도록 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)가 설계되어야 한다.
- ② 시스템 개발과 운용이 편리하도록 소프트웨어 및 하드웨어가 구성되어야 한다.
- ③ 기본적인 데이터가 확보되어 있어야하며 독립적인 단위 프로그램들 간의 데이터 호환성 문제를 해결하기 위해 인터페이스가 설계되어야 한다.
- ④ 향후 컴퓨터 기술 발전에 충분히 대응할 수 있도록 자료 구조를 융통성 있게 설계되어야 한다.
- ⑤ 인터넷에서 사용할 수 있도록 웹(web) 기술이 고려되어야 한다.

#### 다. 시스템 구성 및 기능

설계 기준안과 요구 조건에 따라 해체 디지털 목업 기술이 하나의 통합된 환경에서 운영될 수 있도록 단위 프로그램들간의 인터페이스를 정의하여 각 단위 모듈간의 입.출력 관계를 정립 하였다. 해체 디지털 목업 시스템 구현에 필요한 소프트웨어와 하드웨어의 구성 성분은 다음과 같다.

##### (1) 시스템 하드웨어

- 해체 데이터베이스 서버 시스템
  - DBMS: MS-SQL 2000 Server
  - Window: MS Windows 2000 Server
  - User Interface: MS Visual Basic
  - Network: Web-based and Client/Server
- 해체 디지털 목업 시스템
  - OS: Window 2000 or XP
  - Network: Web-based

##### (2) 시스템 소프트웨어

- 해체 데이터베이스 서버 시스템
  - DBMS: RDBMS(Relational DataBase Management System)
- 연구로 시설 가상 공간 모델링
  - EON, VRML(Virtual reality Markup Language)
- 제염 및 해체 장비 모델링
  - AutoCAD, 3D MAX
- 시뮬레이션 결과물 가시화 프로그램
  - Visual Basic script, JAVA 3D API

##### (3) 단위 시스템 특징 및 구성요소

해체 디지털 목업 시스템을 구성하는 단위 프로그램의 특징과 역할을 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 내용을 살펴보면 다음과 같다.

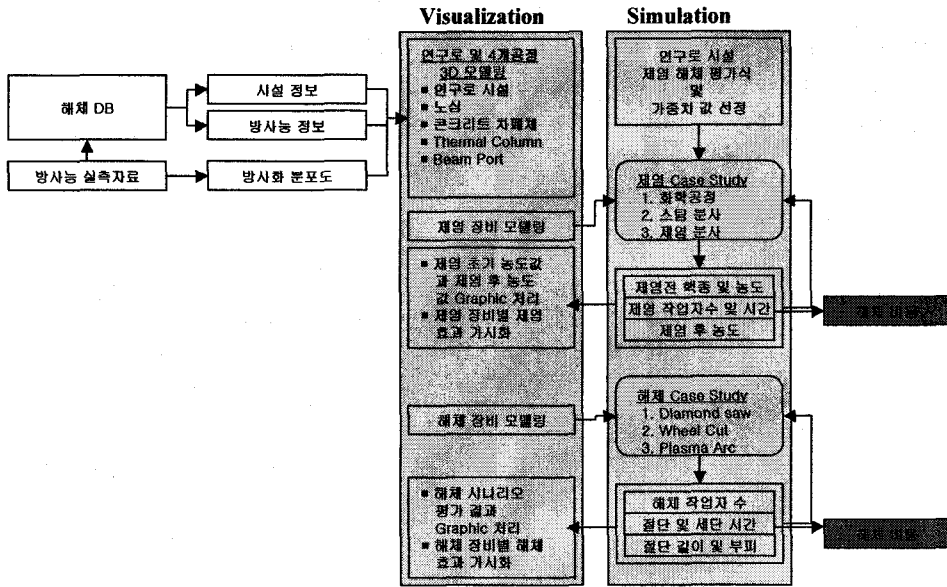


그림 1. 해체 디지털 목업 시스템 구조도

o 해체 데이터베이스 시스템

- 해체 디지털 목업 시스템에서 다루게 될 4개 주요 공정들에 대한 시설 정보 및 방사능 정보는 해체 데이터베이스로부터 추출하여 해체 전 시설들이 갖추고 있는 형상을 설계 도면이나 수치적으로 보여준다. 데이터베이스로부터 가져올 데이터는 시설의 제원 값과 방사능 핵종 및 농도 그리고 공간선량 등이다.
- 해체 디지털 목업 시스템을 통해 생성된 결과 데이터들은 다시 해체 데이터베이스에 저장 관리되도록 설계될 예정이다.

o 방사화 분포도

- 해체 데이터베이스에 저장된 방사능 정보와 연구로 해체 현장에서 측정된 데이터를 입력 받아 해체 대상물의 방사능 분포도를 3차원 그래픽으로 가시화 시킨다. 이 정보를 통하여 작업 방법과 작업 횟수를 결정하게 되고, 작업이 끝난 후 해체를 하기 전 해체 대상물의 절단 위치와 절단 장비 선택 및 절단 개수 등을 결정하는 과정에서 다양한 해체 시나리오를 설정하게 된다.

o 연구로 및 4개 공정의 3D 모델링

- 연구로 2호기와 주변 부속시설의 형상 모델을 컴퓨터 가상공간 내에 실척(1:1)으로 설계되어야 한다.
- 연구로 2호기 내 4개 대상물(노심, 콘크리트 차폐체, Thermal Column, Beam Port)을 3차원으로

로 볼 수 있도록 현실화 시켜야한다.

o 제염 및 해체 장비 모델링

- 방사능에 오염된 시설물을 3가지 종류의 제염 장비를 이용하여 제염하는 과정을 모사하기 위해 화학 제염, 초음파 제염, 그리고 스팀 분사 제염과 관련한 장비를 모델링 하였다.
- 제염을 마친 후 4개의 시설물을 해체하기 위해 각 시설물에 적용될 해체 장비를 선정하여 해체 장비를 모델링 하였다. 노심 해체에 사용될 장비로는 유압 절단기가 있고, 콘크리트 차폐체의 경우는 Diamond Wire, Rock Splitter 그리고 Abrasive Water Jet 장비가 사용될 예정이고, Thermal Column 해체 장비는 Diamond saw, Wheel cutting 그리고 Plasma arc 가 선택되었으며, Beam Port는 기계톱, Nibbler 장비를 이용하여 해체가 수행될 예정이다.

o 연구로 시설 제염 및 해체 평가식과 가중치 값

- 연구로 해체에 필요한 단위 작업별 평가식과 가중치 값은 현재 연구로 2호기를 해체하면서 발생되고 있는 데이터를 해체 데이터베이스 시스템에서 관리하기 위해 적용된 WBS(Work Breakdown System)개념의 단위 작업별 항목에 입각하여 수식을 구한다.

o 제염 공정

- 제염 작업자 투입 인원수에 따라 제염하는데 소요된 시간 등을 수치적으로 표시하여 제염 장비별로 제염 후 나타난 결과 값들을 비교 평가 할 수 있도록 그래픽으로 처리한다.
- 이 수치 데이터는 해체 활동과 연계하여 여러 유형 별로 해체 비용을 평가하는데 사용될 수 있도록 한다.

o 해체 공정

- 작업자가 이동 경로를 통해 해체하고자 하는 시설물에 접근하는 과정을 시각화 할 수 있도록 설계해야 한다.
- 기 개발된 해체 주요 공정 모사 결과 자료를 활용하여 해체 시나리오 별로 해체하는 과정을 3D 모델링 자료를 이용하여 애니메이션으로 보여 줌과 동시에 각 단계별 절단에 소요되는 시간과 해체 작업자 수 및 작업자가 받는 피폭량을 그래픽으로 보여 주어야 한다.
- 선정된 시설물에 대하여 해체 장비 별로 시나리오를 수행할 수 있도록 설계되어야 하며, 이때 발생하는 해체 시간 및 작업자 수 그리고 작업자 피폭선량 등을 평가할 수 있도록 입력 양식이 만들어져야 한다.
- 입력 되는 수치 데이터들은 프로토타입에서 임의의 데이터를 사용할 것이나 시스템 구현시 실제 데이터를 입력할 수 있도록 프로그램 해야 한다.
- 여러 경우의 해체 시나리오에 따라 계산된 결과들은 분석하기 쉽게 그래픽으로 가시화 시켜야 한다.

4. 결 론

해체 디지털 복업 시스템 설계에 필요한 인자들을 도출하였다. 해체 디지털 복업 시스템의 중

요 역할은 방사능에 오염된 환경에서 해체 작업을 가상으로 수행해야 하기 때문에 해체 시설물의 속성들을 3차원으로 설계하여 현실과 최대한 동일하도록 설계하였다. 해체 시설물의 재원 및 방사능 정보 정보들은 해체 데이터베이스 시스템으로부터 지원받을 수 있도록 구성하였으며, 작업자가 받는 피폭선량을 정확히 평가하기 위해서 방사능 농도값을 기초로 하여 방사능 분포도를 3차원으로 재구성하였다. 이와같이 연구로 2호기의 해체 현장을 도면과 기본 정보를 이용하여 3차원으로 모델링한 후 해체 절차에 따라 여러 시나리오별로 해체가 진행되는 과정을 애니메이션으로 볼 수 있도록 설계 하였다. 3D CAD와 가상현실 기술은 해체과정을 시각적으로 보여주는 기능만을 담당하기 때문에 애니메이션 환경에 시뮬레이션 기술을 추가하여 해체 일정을 평가할 수 있도록 아키텍처를 설계하였다. 본 논문에서 고려된 해체 일정 평가 방법은 기초적인 수준이기 때문에 앞으로 수학적이고 통계적인 내용으로 수정 보완 할 계획이다. 이와 같이 해체 공정 디지털 목업 시스템 설계에 필요한 주요 구성 인자들을 확보함으로써 물리적인 목업 시설 없이도 해체 기술 개발에 필요한 실험을 컴퓨터상에서 수행할 수 있는 디지털 목업 시스템의 개념 설계를 완료할 수 있었다.

해체 디지털 목업 시스템은 향후 해체 통합관리 시스템의 한 모듈로써 중요한 역할을 수행할 수 있을 뿐 만 아니라 후행핵연료주기시설 중 핫셀 및 조사후 시험 시설에 대하여 제염 해체 연구에 활용될 것으로 예상된다.

#### 참고 문헌

1. 정기정 외., "Dismantle Plan on Research Reactor 1&2", KAERI-TR-1654/2000.
2. Michel Klein et al., "The Management of Radioactive Concrete Arising from the Dismantling of a Pressurised Water Reactor: The R&D Project on the Recycling of Radioactive Concrete", Radioactive Waste Management and Environment Remediation-ASME 2001.
3. Yukihiro Iguchi et al., "Development of a Decommissioning Engineering Support System of the Fugen NPS", 11th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE11-36270, Tokyo, JAPAN, April 20-23, 2003.
4. Julia L. Tripp et al., "Tools for Optimal Waste and Exposure Reduction", WM '02 Conference, Feb. 24-28, 2002.
5. S. Yanagihara, "COSMARD: Code System for Management of JPDR Decommissioning", J. Nucl. Sci. Technol., 30(9), 890(1993).
6. Roy Manning, Jeremy Gilmour, "Decommissioning Cost Estimating the Price Approach", Waste Management 2002, Tucson AZ, Feb 2002.
7. Charles E et al., "Computer Mapping and Visualization of Facilities for Planning of D&D Operations", Radioactive Waste Management and Environment Remediation-ASME 1995
8. D J Lee et al., "Virtual reality for Inspection, Maintenance, Operation and Repair of Nuclear Power Plant(VRIMOR).
9. Rindahl, G., et al., "International Conference on Safe Decommissioning for Nuclear Activities", IAEA, Berlin, 2002.



10. Vermeersch F , "The Combined Use of 3D Dose Assessment and Human Motion Simulation in ALARA D&D Problems", 7<sup>th</sup> ALARA Network Workshop in Decommissioning of Installations and Site Remediation.
11. F. Vermeersch, C. Van Bosstraeten, "Development of the VISIPLAN ALARA planning tool", Proceeding of the International Conference on Topical issues in Nuclear Radiation and Radioactive Waste Safety, Vienna Austria, 31-August to September 1999.
12. Philippe et al., "Dismantling of the Hot Cell Nr 41 at the SCK-CEN using the ALARA Planning Tool VISIPLAN".
13. Kunio Shiraishi et al., Data Analysis on Work Activities in Dismantling of Japan Power Demonstration reactor(JPDR), JAERI-data/Code-98-010.
14. 박희성 외., "연구로 해체 DB Structure 평가" , Proceedings of the korea society of information technology applications, September, 2003.
15. 두산 중공업., 연구로 1, 2호기 제염 해체 인력 수급 부문 공사, 월간 진도 보고서, 제 42 ~ 43호, 2003. 7.
16. R.J. Morford, "Source Term and Shielding Calculations to Support Decommissioning of Shippingport Reactor," WHC-SA-0206, Westinghouse Hanford Company, 1988.
17. Le Goaller C., Costes JR., "On Site Nuclear Video Imaging". Waste Management 1998, Tucson AZ, Feb 1998.