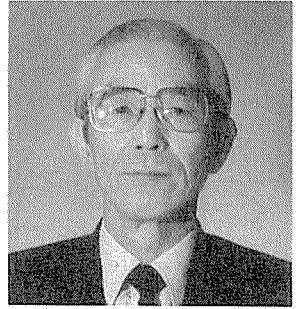


## 최근의 원자로해체 현황



서 두 환

한국원자력연구소  
책임연구원

1970년대와 80년대에 걸쳐 수행된 연구로 등 소규모의 원자로해체 프로젝트에서 많은 경험을 얻었고, 대규모의 실용시설을 해체하기 위한 각종 기술이 실증되었다. 그리고 1980년대 말부터 1990년대 초에 걸쳐서 독일, 일본, 영국, 미국 등 많은 IAEA 가맹국에서는 대형발전원형로의 해체프로젝트가 실시되었다. 이들 중에는 규모나 방사능인벤토리의 관점에서 상업용원자력발전소에 필적하는 것이 있었다. 이러한 원자로해체프로젝트는 대형시설을 완전히 해체할 수 있다는 실행가능성을 밝히는 동시에, 이에 필요한 기술을 시험, 최적화하는데 있었다. 최근, 숫적으로는 적지만 상업용원자로가 폐쇄되고, 이들 시설에 대한 해체계획이 입안되고 있다.

1995년에는 독일의 Wurgassen발전소와 캐나다의 Bruce-A2발전소가 폐쇄되었다.

독일에서 가장 오래된 원자력발전소인 Wurgassen발전소의 운영자인 프로이센전력은, 1995년 9월에 동발전소의 폐쇄를 정식으로 신청하였다. 이미 해체의 최초단계인 신청서를 관련 인허가당국인 주경제부서에 제출하였다. 동사는 1995년 6월, 원자로 내부수리에

필요한 비용을 언급하고, 24년간 운전한 동발전소를 폐쇄한다고 발표하였다. 캐나다에서는 온타리오·하이드로사가 1995년 10월, 18년간 운전한 Bruce-A2발전소(904MW)를 폐쇄하였다. 동사의 결정은 과거 4년 동안에 전력수요가 떨어졌다는 것과, 앞으로도 전력수요의 증가는 전혀 없을 것이고, 있다고 하더라도 작을 것이라고 판단하였기 때문이다. 1986년 Bruce발전소는 증기발생기를 보수하고 있던 작업원이 납으로 된 방호블랭킷을 잘못하여 세관속으로 질러 넣었기 때문에, 넓은 범위의 납 오염사고로 손상을 받았다.

이 문제를 해결하기 위하여 필요한 금액은, 동발전소의 가치를 초과할 것이라고 간주하였다. 현재, 동발전소는 밀폐관리하고 있으며, 얼마만큼의 자금이 필요한가에도 달려 있지만, 앞으로 운전을 재개할 가능성은 남아 있다.

1995년에는 독일의 FRG-2, 영국의 UTR-300, 폴란드의 EWA, 미국의 UI-LOPRA와 UI-TRIGAF 그리고 S5G 잠수함 원형로 등 6기의 연구로가 폐쇄되었다. 이들 중 5기의 연구로는 30년 이상, UI-LOPRA는 24년간 가동하였다.

## 독 일

FRG-2 연구로를 폐쇄하기 위한 인허가는 1995년 1월에 연방의 재무·에너지성에서 발급되었다. 원자로의 운전자인 GKSS와 연방연구기술성, 산업계 등은 발전로의 안전성이나 원자력발전소의 부속품을 개발·시험하기 위한 원자로에서는 실험을 더 이상 할 필요가 없다고 판단, 동로의 폐쇄신고를 1993년에 제출하였다. 또 미국에 의한 사용후연료의 거래가 미국의 정책에 따라 지연되었기 때문에, 원자로의 사용후연료풀이 가득차게 될 것이라는 우려가 있었다. 이와 같은 사실은 FRG-1 연구로의 운전을 계속하기 위해서는, FRG-2 연구로의 운전을 중지해야 한다는 계기가 되었다.

1958년에 최초임계에 도달한 FRG-1은 FRG-2와 풀을 공유하고 있다. 15MW 출력을 갖는 FRG-2는 독일 최대의 재료시험로로서, 30년 이상 안전하게 운전하여 왔다. FRG-2는 FRG-1과 풀을 공유하고 있기 때문에, 동로를 해체하는 데는, FRG-2의 운전이 필요한 부분만 한정된다. 제거해야 할 주요부속품은 원자로방호시스템, 계장기기, 1차냉각계의 오염부분(약 34톤의 철물) 등이다. 이들은 제거한 후, 오염의 성질이나 정도를 조사한다.

## 일 본

JPDR(90MW)의 해체계획은, 1981년 일본 원자력연구소(JAERI)에서 시작되었다. 이 프로젝트의 목적은, JPDR과 상업용원자력발전소의 해체기술을 개발하는 동시에, JPDR의 해체시에 이와 같은 기술을 실제로 실증하는데 있다. 실제의 해체작업은 1986년에 시작하여 1996년에 완료되었다.

1995년에는 건물내와 주변의 나머지 기기(크레인, 환기시스템, 냉각탑 등)가 철거되었

다. 또 터빈건물, 방사성폐기물건물, 원자로 둘레의 콘크리트표면은 쇼트플래스터, 스캐블러, 소형삭암기 등을 사용하여 제거하였다. 부속건물의 철거는 1995년 1월에 시작하였다. 방사화되거나 방사능으로 오염된 모든 기기와 콘크리트의 표면은 제거하였다. 1995년 말, 해체프로젝트에서 발생한 원자로차폐체나 오염구조물 등의 콘크리트 조각인 1,700톤 정도의 VLLW를 사용하여, 얇은 층 처분법의 시험프로그램에 착수하였다. JAERI는 원자로 부지에 45m×16m의 피트를 파서, 그 속에 VLLW를 3.5m 높이로 배치하고, 이 작업은 1996년 3월까지 계속하여, 그 후 VLLW 위에 2.5m 두께의 흙을 덮기로 하였다. 그 지표에는 풀을 심고, 주변에는 울타리를 치고, 관리건물을 짓는다. 이 VLLW처분구역은 빗물의 침입을 막기 위하여 특수한 텐트를 친다.

JAERI는 1995년 5월, 일본 유일의 원자력 선인 「무쯔」의 원자로실을 철거하기 시작하였다. 「무쯔」는 부선거로 유인되어 여기서 해체작업이 진행되고 있다. 원자로는 철거되고, 다른 오염물질과 함께 저장된다. 이 저장건물은 최종적으로 박물관으로서 이용하며, 여기서 원자로는 공개된다. 원자력화물선의 원형 선인 「무쯔」는, 원자로가 임계에 도달한 후, 곧 방사선누출을 일으켜, 1990년까지 원자로는 밀폐관리되었다. 그 후, 「무쯔」는 시험항해를 무사히 끝내었지만, 몇몇 나라는 기항을 거부하는 등의 문제가 발생하였다.

## 슬로바키아

Bohunice에 있는 전기출력 150MW의 A-1원형로는 연료는 천연우라늄, 감속재는 중수, 냉각재는 이산화탄소를 사용한 원자로이며, 1972년에 운전을 개시하였다. 이 원자로는 연료봉이 튀어나오고 원자로홀에 냉각재의 이산화탄소가 방출된 사고가 일어난 1976년에는, 8개월 동안

운전이 중지되었다. 폐색된 연료집합체의 일부 용융으로 1977년에는 중대한 노심손상사고가 일어났다. 당시의 체코슬로바키아 정부는 1979년에 동로를 해체하기로 결정하였다. 그러나 원자로는 폐쇄한 채, 해체작업은 하지 않았다. 1991년에는 손상연료를 수송할 수 있도록 처리하는 과정에서 원자로의 핫셀에서 일어난 과잉 압력사고로, 수/의 오염액체가 원자로 건물내의 마루에 누설되었다. 누출된 액체는 거의 제거되었지만, 다소의 오염이 남았다.

A-1로의 해체프로젝트에 대해서는, 최근 국제적인 지원을 신청하였고, 영국의 AEA테크놀로지사와 A-1로 소유자와의 사이에 120만 불로 해체계약이 맺어졌다. 동로의 해체는 최종적으로 원자로홀을 통상적인 관리구역상태로 복귀하는 것을 목적으로 하고 있다.

프랑스의 SGN사는 A-1로 운전자에 대하여 손상된 사용후연료의 처리에 대한 실행가능성에 관한 최종보고서를 제출하였다. SGN사는 손상된 연료집합체의 용해·유리교화를 제안하는 동시에, 이 작업을 수행하기 위한 집중시설을 1999년에 가동할 목표로 건설할 것을 제안하였다. 현재, A-1로의 저장풀에 저장되어 있는 연료집합체는 원자로를 해체하기 전에 처리해야 할 상황에 있다.

한편, 일본의 과학기술청(STA)은 A-1로의 해체에 대하여 기술을 지원하기로 하였다. 이 지원은 1995년도 부터 시작하는 5개년 계획의 일환으로 수행되는 것으로서, 이를 위하여 5,000만엔의 예산이 계상되어 있다. 이 지원중에는 해체계획 입안에 관한 소프트웨어, 노하우, 경비견적, 환경평가, 132개 연료봉의 처리·처분을 위한 측정 등이 포함되어 있다.

## 스 페 인

가스냉각, 흑연감속형 원자로인 Vandellós-1(전기출력 480MW)은 프랑스원자력청(C-

EA)이 설계한 것이다. 동로는 운전개시후 17년이 지난 1987년, 고압터빈에서 일어난 화재로 폐쇄되었다. 법령에 따라, 연료인출이나 조업중 생긴 폐기물의 처리 등, 해체시에 만족시켜야 할 조건이 정해졌다. 이 조건중에는 이미 해결된 것이 있다. 연료인출작업은 스페인과 프랑스의 합자회사인 HIFRENSA에 의하여 수행되어, 압축고화가 가능한 고체 LLW 등 조업에 따라 생긴 폐기물은 처리하였다. 각종 조사금속조각의 특성평가와 처리, 또 Zeolite나 유기물 등 40m<sup>3</sup>의 수지는 드럼통 속에 시멘트고화 하였다. 남은 것은, 윗쪽에 좁은 출입구를 갖는 7×9×24(m)의 3개 콘크리트체 볼트 내에 넣었다.

이 볼트 내부의 방사능준위는 출입구 부분의 선량률이 약 40mSv/h로 다소 높았다. 이와 같은 폐기물처분의 현황을 개선하기 위하여 국제입찰하여, 스페인의 Equipos Nucleares(EN)사와 프랑스의 FRAMATOME사의 콘소시엄이 수주하였다. EN사는 볼트의 세척작업과 흑염이외의 폐기물처리를, FRAMATOME사는 흑염폐기물의 처리를 맡았다. EN사는 기술평가를 실시하여, 볼트 출입구에서 볼트 내에 내린 용기속에 폐기물을 넣기 위하여, 긴 팔을 갖는 원격조정장치를 사용키로 결정하였다. 용기가 가득 차면 수송컨테이너에 넣어서 밀폐한다. 그후, 볼트무리의 끝에 있는 폐기물처리공장에 천장크레인으로 운반되고, 여기서 수송컨테이너를 내려 용기속의 폐기물은 선별실로 방출된다. 그리고 용기는 회수하여 같은 일이 반복된다. EN사는 이 폐기물제거 작업을 실시하는데 국제입찰 후, 원격조정장치의 제공을 받기 위하여 AEA테크놀로지를 하청회사로 선정하였다. 방사성폐기물의 세척·처리작업은 1999년말까지 끝날것으로 본다.

## 영 국

1995년, AEA테크놀로지는 Windscale 개

량형 가스냉각로(WAGR)의 190톤이나 되는 4기의 열교환기 철거작업을 끝내었다.

철거한 열교환기를 근처에 있는 영국원자연료 회사(BNFL)의 드리그 LLW 처분장으로 수송한다는 것은 지금까지 영국에 있었던 수송중에서 가장 어려운 것이었다. 유럽에서 최대급인 1,000톤 이동크레인을 사용하여 원자로돔의 지붕에서 열교환기를 들어 올릴 수 있었다. 철거한 열교환기는 96개의 바퀴를 가진 수송용크러러로 10마일 떨어진 드리그처분장으로 수송하였다. 수송하는데 6시간이나 걸렸기 때문에, 도로를 폐쇄하지 않으면 안되었다. WAGR의 해체는 BNFL의 재처리공장내에서 Windscale원자로를 운영하고 있는 UKAEA의 정부부서(GD)가 책임을 맡고 있다. UKAEA-GD는 주원자력공사의 118억불 원자력채무를 인수하기 위하여 1995년에 설립되었다. WAGR은 발전로의 해체실행가능성을 실증하기 위해서 이용되고 있다. 이 프로젝트에 소요되는 경비는 8,000만 파운드이다. WAGR의 연료와 고방사능물질은 원자로가 폐쇄되었을 때 철거되었다. 열교환기가 철거되고, 다음 단계는 남은 폐기물을 처리하기 위한 기기의 설치이다. 이 작업을 위한 원격해체기계는 이미 설치되어 있다. WAGR 노심의 해체와 폐기물의 패키지를 위한 계약은 곧 체결될 것이다.

연구로 쪽은 Harwell에 있는 DIDO, DLUTO, GLEEP는 5년동안에 해체계획이 종료되었다. UKAEA-GD로 하여금, 다소 방사능이 남은 차폐체는 유지키로 되어있다.

## 미 국

미국의 해체프로젝트는 그동안 많은 진전이 있었다. 미국내의 전력회사로서는, LLW의 처분비용이 해체비용에 큰 몫을 차지하고 있을 뿐만 아니라 불확정적인 요인으로 되어 있다. 또 사용후연료의 철거 여부가 불확실하다는 이유로, 전력회사는 사용후연료를 부지

내에 할 수 없이 저장하고 있다. 이것이 해체 프로젝트를 방해하고 있다.

1979년에서 1989년까지 운전한 Fort St. Vrain(전기출력 33만kW)는 고온가스 냉각로이다. 동로는 1989년 8월에 폐쇄되었다. 웨스팅하우스사와 모리슨·쿠누센사는 1990년 6월, 동로의 해체계약을 체결하였다.

두 회사는 작업을 쉽게 하기 위하여, 원자로의 상부를 잘라내어 건조상태에 있는 원자로 속에 물을 주입하여, 차폐와 오염관리를 하는 혁신적인 방법을 제안하였다. 원격기기를 사용하여 수중에서 작업하면서 각 부속품을 철거기로 하였다. 먼저 Prestressed Concrete제 압력용기 상부판의 중앙부분을 다이아몬드·줄톱으로 12구획으로 절단하고, 다음 작업을 위해서 회전작업장을 설치하였다. 상부 라이너를 산소창(Lance)으로 절단, 철거하고 원자로내 부구조물을 철거하였다. 철거 시에는 물이 차폐역할을 하였다.

해체완료와 원자력규제위원회(NRC)의 인허가 종료에는, 모든 방사성물질이 적절히 철거되었음을 판단하기 위한 최종적인 조사가 필요하며, 이것이 끝나면 제한없이 사용할 수 있다. Fort St. Vrain로의 상세최종계획서는 1995년 1월 NRC가 승인하였다. 이 계획은 이미 실행중이며, 콜로라도·퍼브릭서비스가 원자력 이외의 발전소를 이 장소에 건설한다는 계획의 제1단계를 착수하기 위하여, 동로의 부지일부는 개방되어 있다. 모든 작업의 완료와 NRC에 제출할 최종조사보고는 1996년 1월로 예정하고 있다.

1995년, NRC는 롱아일랜드발전청(LIPA)의 Shoreham 원자력발전소에 대한 인허가 종료의 명령을 교부하였다. NRC는 동발전소의 방사능오염준위는 부지를 무제한으로 사용하는데 개방할 수 있을 정도로 충분히 낮다고 판단하였다. 롱아일랜드전력회사(LILCO)에 의해서 건설된 Shoreham발전소(BWR)는 1985년 2월에 초기임계에 도달하였다. 5%까지의 저출

력 운전허가도 발급되었지만, 2년만의 계속적인 시험운전 뒤에, 1987년 6월 동발전소는 정지하였다. LILCO는 곧 이어서 전출력운전을 위한 인허가를 신청하였다. 이 신청은 1989년에 정식으로 인정되었지만, 그후 이 인허가는 취소되었다. NRC는 이것을 수락하여 LIPA로의 소유인허가 이전을 승인, 1992년에 해체가 개시되었다.

포트랜드·제너럴·일렉트릭사(PGE)는, 1995년 11월 Trojan원자력발전소의 150톤 가압기를 철거하여, 워싱턴주 리치랜드 근교에 있는 LLW 처분시설에 매설하였다. 이것으로써 Trojan로의 제1차 해체계획은 완료되었고, 당초 건적한 경비로 계획대로 대형기기를 철거하였다. 1996년 초에는 4기의 증기발생기도 철거를 끝내었다. 이들 기기는 부지내에 저장되어 있다. Trojan로는 경제성이 문제가 된 발전소의 하나로서 1993년에 폐쇄된 것이다. 동발전소에서는 증기발생기의 경제성문제에 시달려, 다른 원전과의 경쟁을 이길 수 없었다. PGE사는 원자로내부구조물을 동발전소의 사용후연료풀로 옮기기로 되어 있는 1997년까지는, 그 이상의 해체작업은 착수하지 않기로 하였다. 앞으로의 해체작업은 사용후연료를 언체풀에서 반출할 수 있는가에 달려있다. 이와 같은 이유로 PGE사는 1998년 중반기를 목표로 발전소부지 내에 건식저장시스템을 설치할 것을 계획하고 있다.

동사는 해체를 2000년에 종료하고, 2001년에 NRC로부터 검증을 받는다는 계획을 세우고 있다. 이것으로 건식저장 시설의 인허가를 제외하고, 동발전소 부지에 대한 NRC의 인허가는 모두 종료된다.

코먼웰스·에디슨사는 1978년에 폐쇄된 Dresden-1의 부지에, 사용후연료용의 건식 저장시설의 설치를 계획하고 있다. 동사가 소유하고 있는 12기의 원자력발전소에서 발생하는 사용후연료의 저장풀은, 2000년까지는 충분한 용량을 가진다.

그러한 사실에도 불구하고 동사는 미국내의 다른 전력회사와 같이, 적어도 사용후연료의 영구저장소가 개설되기까지는 부지내에 건식저장소를 건설키로 하였다. 건식저장시설은 Dresden-1의 연료풀 근처에 만들고, 금속제의 수송용 Over Pack을 지탱하는 강화콘크리트·패드로 구성된다. 사용후연료는 철제의 컨테이너속에 밀폐되고, 금속제의 Over Pack 속에 놓아진다. 사용후연료풀은 NRC로서는 현안사항으로 되어있다. 1994년 1월에는 외기온도의 저하로 격납건물내의 급수관을 가열할 수가 없어서 파손되었기 때문에, 약 200m<sup>3</sup>의 물이 누출되었다. NRC는 이것을 수락하여, 소유자에 대하여 사용후연료의 안전저장을 확실히 하기 위한 행동계획을 제출하도록 동원자로의 조기정지를 요구하였다.

사크라멘토 공영전력(SMUD)은 1995년 3월 NRC에 대하여 21년간 운전한 Ranch Seco원자력발전소의 해체계획을 제출하였다. 이 해체작업에는 3억 4,400만불이 소요될 것이며, 금세기 내에는 끝나지 않을 것으로 보고 있다. 이 해체경비중, 약 2,000만불은 발전소부지내에 건설키로 한 사용후연료 저장시설의 건설에 할당되고 있다. 앞으로 10~15년 사이에 사용후연료를 저장하기 위한 경비는 9,000만~1억 불로 보고 있다. 사용후연료는 DOE가 HLW 저장시설로 인수할 때까지 부지내에 저장된다. DOE의 사용후연료 인수는, 아무리 빨라도 2010년에서 2020년 이후로 된다고 보고 있다. 발전소부지에서 원자로 부속품을 비롯하여 방사화된 물질을 철거하는데는, 1억 7,500만~1억 8,000만불이 더 소요된다고 생각하고 있다. 이 금액중에는 LLW시설에서의 처분요금과 수송비용이 포함되어 있다. 해체작업과 함께 발생하는 대량의 LLW는 캘리포니아주의 워드밸리에 있는 처분시설로 보낸다. 원자로건물을 해체철거하여, 부지를 녹지로 복구하기 위해서는 그 위에 4,

000만불이 더 소요될 것으로 보고 있다.

SMUD는 1998년까지 사용후연료를 풀에서 인출하여 건식캐스크저장으로 변경할 것을 목표로 삼고 있다. 모든 환기기능을 가진 표준형 스테인레스철제의 캐스크제작은 이미 시작하였고, 사용후연료는 이 캐스크에 수납된 단계에서 발전소는 밀폐관리상태로 놓인다. 사용후연료 저장폴의 물은 빼내고, 모터가 필요한 것은 조업중의 건식저장시설 뿐이다.

또 발전소의 입구에는 방호벽이 설치되고 출입은 제한된다. 사용후연료 캐스크를 모니터링하기 위하여 소수의 직원이 부지에 상주하게 된다. SMUD의 계획에 따르면, 동발전소는 2008년까지 이 상태로 유지되고, 이 시점에서 다시 원자로의 해체작업과 발전소부지의 제염작업이 실시된다. 이 작업은 3~4년 걸릴 것으로 보고 있다. Ranch Seco발전소의 운전인허가는 2011년경에 종료될 것이다.

만약, NRC가 최근의 연방공소재판소의 판결을 받아들이고, 양키아토크전력회사(YAEC)에 대하여 YankeeRowe원자력발전소의 해체작업을 중지시키는 일이 생기면, 동발전소를 해체하는데 걸리는 기간이 연장될 뿐만 아니라, 경비도 상승할 가능성이 있다. 경비의 증가는 주로 LLW의 처분에 관계되는 것이다. 보스턴 제1순회공소재판소는 1995년 7월말 YAEC사의 정식해체계획이 승인될 때까지는 동사의 해체작업을 허가하는 방침을 재고토록 NRC에 명령하였다. 이에 대하여, NRC는 이 판결에 대하여 공소하지 않는다는 것을 발표하였다. 참고로, NRC는 동사에 대하여 수많은 원자로부속품의 처분을 허가하고 있었다. 한편, 미연방규제기준(CFR)의 10CFR50.59에는 전력회사는 더 상세한 인허가절차를 경유하는 일 없이, 발전소에 어떤 변경을 할 수 있음을 허가한다고 명기하고 있다. YAEC는 Yankee발전소

의 4기 증기발생기나 가압기, 원자로 내부 구조물을 철거·수송할때, 이 50.59규칙을 따랐다. 만약 NRC가 YAEC의 해체작업을 중지시키는 일이 생기면, 동사는 남캐롤라이나주 반월에 있는 켈뉴크리어·시스템즈사의 LLW 처분시설을 이용할 수 없게 되며, 매사추세츠주가 독자적으로 시설을 개설할 때까지 기다려야 한다고 생각하고 있다.

연구로에 관해서는 Argonne국립연구소의 EBWR과 CP-S의 해체에서 큰 진전이 있었다. EBWR의 실제적인 해체작업은 1994년에 시작하여 현재는 거의 끝났다.

1995년에는 방사화된 생체차폐콘크리트의 최후 부분이 철거되었다. 감용한 원자로내부 구조물을 넣은 최후의 용기가 사용후연료풀에서 철거·포장되어, DOE의 한포드처리부지로 운반되었다. 그후, 사용후연료풀은 제염되고, 풀에 있는 물의 여과·이송 시스템이 절단되고, 처분용으로 포장되었다. 또, 동시설의 HEPA환기시스템도 감용·포장되어 한포드로 수송되고 처분되었다. CP-S는 1995년에 모든 공정시스템이 철거되고 무사히 해체가 끝났다. 이들 폐기물도 DOE의 한포드처분장으로 운반되고 처분되었다.

## 후 기

우리나라는 1995년말 한국원자력연구소(KAERI)가 소유하고 있는 서울소재의 연구로 1호(TRIGA Mark-II, 250kW), 연구로 2호(TRIGA Mark-III, 2MW)를 KAERI 대전연구단지로의 이전, 노후화, 새로운 대형연구로인 하나로(30MW)의 가동, 비경제적인 운전, 이용률 저하 등의 이유로 폐쇄하였다.

현재, 3년계획으로 1999년말 까지 해체철거할 것을 목표로, 해체계획서를 작성중에 있다. 해체경비는 약 100억원으로 잡고 있다.