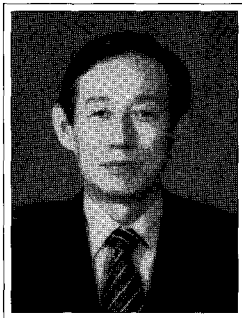




핵연료 기술 개발 동향 및 전망

양 창 국

한진원자력연료(주) 사장



머리말

지난해 12월 8일은 미국 아이젠 하워 대통령이 1953년 유엔 총회 연설에서 「평화를 위한 원자력」을 선포한 지 50주년이 되는 날로, 세계 원자력계는 그 의미를 되새기며 지난 50년간 원자력계의 변화를 되 돌아보고 앞날을 내다보며 자축 행사를 벌였다. 금년은 세계 최초의 원자력발전소인 소련의 오브린스크 발전소가 상업 운전해 들어간 지

50주년이 되는 해이다.

지난 반세기 동안 세계 여러 나라는 반핵의 거센 저항을 받으며 화석 연료 대체 에너지원으로 원자력발전소 건설을 꾸준히 추진하여 왔다.

2003년 말 현재 총 33개국에서 444기의 원전이 운전중이며, 그 용량도 374,900MWe로 세계 전력의 15%를 담당할 만큼 성장하였으나, 상당 기간 원자력발전소의 신규 건설은 한·중·일 극동 3개국과 동구권 등 몇 개국을 제외하고 멈춰 있었다.

최근 유럽에서는 EPR의 건설 움직임이 살아나고, 미국에서도 3~4년 내 신규 원전 건설이 가시화될 것이라는 밝은 전망을 언급하는 등 긍정적인 면도 있으나, 독일 등 일부 국가는 아예 원자력을 폐쇄하는 프로그램을 진행하는 등 화석 연료 대체 에너지로서 원자력의 위상이 흔들리는 조짐도 보이고 있다.

미국 등은 신규 원자력발전소를

건설하는 대신에 운전중인 원자력 발전소의 수명을 연장하고, 발전소 가동률을 높이며, 발전소의 출력을 높이는 등 기존 발전소의 효율을 극대화하는 방향으로 원자력 프로그램을 추진하고 있다.

104기의 원전을 운영하고 있는 미국의 경우, 2003년 말 현재 19기 원전의 수명 연장 인허가를 받았으며, 향후 3년 내에 50% 이상의 원전이 수명 연장을 추진할 것으로 예상된다. 또한 출력 증가 프로그램의 추진으로 4,000MWe 추가 용량을 확보하게 되었다.

그에 따라 2010년부터 원자력 발전 용량의 감소가 예상되었던 미국은 그 시기가 2030년으로 늦춰졌다.

발전소의 가동률도 높아져 세계 원자력발전소 평균 가동률은 1991년 67.8%에서 2002년 78.9%로 11.1%나 높아져 총40,000MWe 이상의 추가 용량을 확보한 효과를 얻

게 되었다.

원자력발전소의 출력 증가를 위해 운전 여유도를 증가시키고, 발전소 가동률 향상을 위해 장주기 운전 방식을 도입하는 등 발전소측 요구 조건을 충족시키고, 핵연료 시장 경쟁에서 살아남기 위해 핵연료 주기의 경제성을 높이는 성능 개선을 역동적으로 추진하고 있다.

선형 핵연료 주기 중 농축과 성형 가공 분야의 기술 개발 동향과 전망을 간략히 살펴본다.

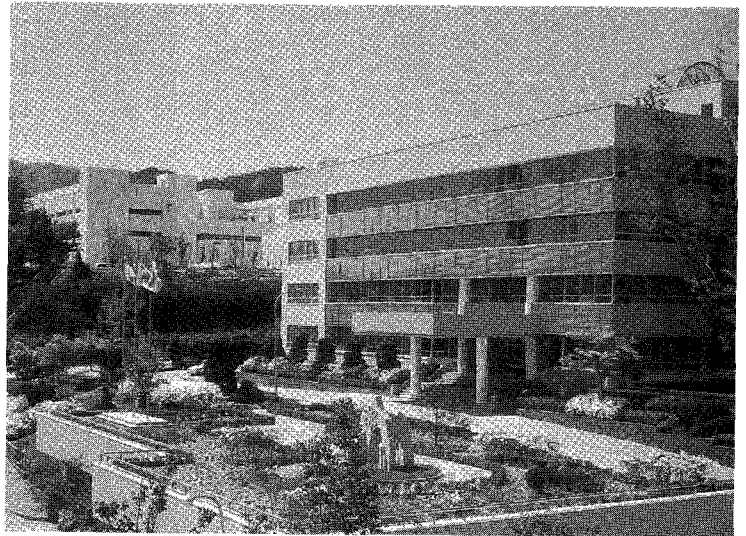
핵연료 기술 개발 동향 및 전망

핵연료는 핵분열을 일으켜 에너지를 얻으며, 핵분열 과정에서 방사성 물질이 발생한다. 핵연료의 건전성이 파손될 때 방사성 물질이 환경에 노출될 수도 있으므로 핵연료의 건전성은 원자력발전소 안전과 직결된다.

따라서 원자력발전소는 핵연료의 건전성을 유지하는 전제로 운전되며 핵연료 건전성을 유지하기 위하여 원자력발전소 운영에 출력 상승률 등 제약이 따른다.

건설이 끝난 원자력발전소의 고장비는 확정되어 있으므로 운전중인 원자력발전소의 원가 절감을 위하여 핵연료 주기비의 절감은 원자력 발전 원가 절감의 주요한 요소가 되고 있다.

또한 핵연료 주기 중 농축과 재처



한전원자력연료(주) 전경

리 분야는 핵확산과 관련된 예민한 분야로 그 개발 및 전수에 국제적인 제약이 따르고 있다.

그에 따라 핵연료 기술 개발은 안전성과 경제성을 향상시키는 한편 발전소 운영에 편의성을 높이고, 방사성 폐기물 발생량을 줄이며, 핵확산 저항성을 높이는 방향으로 추진되고 있다.

우라늄 농축의 경우 1980년대에 서 1990년대까지 원심 분리법과 기체 확산법 농축 기술이 양립하며 시장을 양분해 왔다.

기체 확산법 농축 기술은 건설 투자비가 높고 운영시 막대한 에너지가 소비되나 운영 보수비가 비교적 적게 드는 장점이 있으며, 원심 분리법은 모듈식 건설로 건설비가 저렴하고 시설 증설이 용이하나 운영 보수비가 많이 드는 단점이 있다.

기체 확산 농축법을 사용하던 미

국과 프랑스 등은 다음 세대 농축 기술로 레이저 농축 기술을 선정하였다. 미국과 프랑스는 레이저 농축 기술은 경제성에서 기존 농축 방법보다 월등히 유리하고, 농축 분리수가 커서 농축 후 폐기되다시피 한 감손 우라늄을 농축할 수 있는 등 장점이 있다고 선전하며 다투어 기술 개발을 추진하였으나, 레이저를 이용한 우라늄 분리 기술을 우라늄 농축 기술로 사용하는 것을 포기하였다.

미국은 20여억달러를 투자하여 1970년대부터 개발하던 원심 분리 농축 기술을 1985년 포기하고, 레이저 농축 기술을 다음 세대 농축 기술로 선정하고 개발에 열을 올리며 상용화 계획까지 발표하였으나, 2000년대에 들어서 그 계획을 포기하고 원심 분리법 농축 기술 개발의 재개를 추진하고 있다.



한편 URENCO(영국·독일·네덜란드 합작 회사)는 미국에 동 회사 기술인 원심 분리법을 이용한 농축 시설 건설을 위하여 미국 회사와 합작으로 LES사를 설립하고 부지 확보와 인허가를 추진하고 있다.

레이저 농축 기술을 개발하던 프랑스도 레이저 농축 기술 개발을 포기하였으며, 기체 확산법 농축 시설을 운영중인 EURODIF(프랑스·이탈리·벨기에·스페인 합작 회사)는 운전시 막대한 전력이 소요되는 Besse 기체 확산식 농축 시설을 대체하여 URENCO의 원심 분리 농축 기술을 도입, 카다라쉬에 2005년 4월 건설을 시작하여 2008년 준공 목표로 건설을 추진 중이다.

핵연료 성형 가공 분야가 선행 핵연료 주기비 중 차지하는 비중은 20~25% 수준으로 크지 않으나 핵연료 주기비를 결정하는 가장 중요한 핵연료 설계를 수행하는 분야로서 원자력 발전 프로그램을 가진 대부분의 나라에서 국산화를 달성하여 그 공급 능력이 수요를 크게 초과하여 시장 확보 경쟁이 핵연료 주기성분 중 가장 치열하며, 각 공급사는 경쟁력 있는 핵연료 공급을 위하여 연구 개발에 많은 투자를 하고 있다.

핵연료 성형 가공 분야의 중요 기술 개발 방향은 핵연료의 건전성을 높여 안전성을 제고하기 위하여 지



핵연료 성형 가공

지 격자·상하단 고정체 등 구조 물질의 설계를 개선하며, 경제성을 제고하기 위하여 중성자 경제성이 높은 재질을 개발하고, 독물질봉을 개선하며, 저누설 장전 모형 개발 등 노심 관리 기술을 개선하고, 경제성과 핵비확산성을 높이기 위하여 연소도를 높이고 있다.

사용후 방출되는 핵연료의 평균 연소도가 1980년대 30,000MWD/MTU 수준에서 2000년대 55,000MWD/MTU 수준으로 높아져 핵연료가 원자로 내에 머무는 기간이 약 3년에서 약 5년으로 길어짐에 따라 부식 등에 강한 핵연료 피복재의 개발도 박차를 가하고 있다.

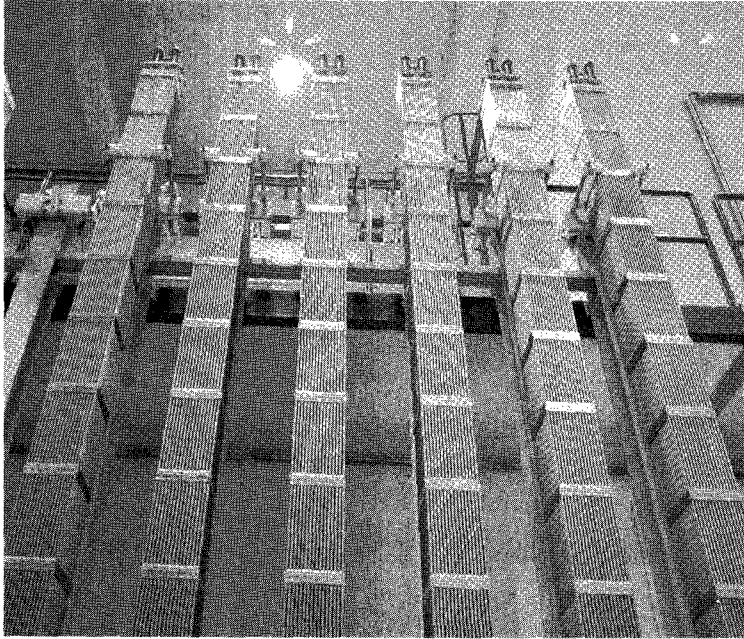
핵연료 영역 평균 연소도를 50,000MWD/MTU 수준까지 높이는 것이 경제성 측면에서는 가장 유리한 것으로 분석되고 있으나 미국 등에서 70,000MWD/MTU 수준으

로 계속 연소도를 높이려고 연구 개발을 하고 있으며, 그 이유는 핵비확산성을 높이기 위한 것으로 판단된다.

연소도가 높아짐에 따라 사용후 핵연료 속에 초우라늄 계열 원소의 농도가 높아져서 사용후 핵연료의 재처리기가 현재 기술로 어려우며, 사용후 핵연료 속에 잔존하는 플루토늄의 핵분열성 물질의 함유비가 낮아져 핵확산 위험이 줄어든다.

사용후 핵연료의 방출 연소도가 높아지면 고준위 방사성 폐기물인 사용후 핵연료의 방출량이 줄어드는 효과도 있다.

영역 평균 방출 연소도가 35,000MWD/MTU에서 55,000MTU으로 증가할 시, 450일 주기 길이를 상정할 때 대 주기 교체 핵연료 다발수는 35,000MWD/MTU의 경우 농축도 3.7% 신연료 84다발,



한국 표준형 원전용 개량 핵연료

55,000MWD/MTU의 경우 농축도 4.9% 신연료 54다발이 소요되어 사용후 핵연료 방출량이 약 50% 줄어든다.

우리 나라는 농축 기술의 국산화 계획은 없으나, 핵연료 성형 가공 분야의 국산화를 1970년대부터 추진하였으며, 국산화 추진 기관인 한전원자력연료주식회사를 1982년 11월 설립하였다.

한전원자력연료주식회사는 1988년에 연산 200톤 규모의 경수로 핵연료 성형 가공 시설을 준공하여 국산화를 달성하였으며, 중수로 핵연료 성형 가공 분야는 원자력연구소가 1978년 프랑스에서 도입한 연산 10톤 규모의 시작 공장을 개조하여

1986년 연산 100톤 규모의 시설을 가동하기 시작하면서 국산화를 이루었다.

1998년 한전원자력연료주식회사는 연산 200톤 규모의 경수로 연료 가공 시설을 증설하고, 연산 400톤 규모의 중수로 성형 가공 시설을 준공하였으며, 그에 따라 원자력연구소에서 운영중이던 100톤 규모의 중수로 가공 시설은 폐쇄하였다.

한전원자력연료주식회사는 경수로와 중수로 성형 가공 분야를 국산화할 때 해외에서 설계와 제조 기술을 도입하였으나, 그 후 기술 자립을 위한 노력을 계속하여 현재는 기술을 자립한 단계이다.

경수로 원자로용 핵연료 제조 기

술은 독일 SIMENS-KWU에서, 웨스팅하우스 형 원자로용 핵연료 설계 기술은 전신(前身) 미국 웨스팅하우스사에서, 한국형 원자로 핵연료 설계 기술은 전신 ABB-CE사로부터 기술을 도입하였으며, 현재 기술 도입사에서 개발한 핵연료인 RFA (Robust Fuel Ass'y, 웨스팅하우스형 원자로, 17×17형 핵연료)와 GUARDIAN 연료(한국형 원자력발전소)를 한국수력원자력(주)에 공급중이다. 중수로형 핵연료 제조 기술은 캐나다 CGE사로부터 도입하였다.

한전원자력연료주식회사는 개발된 핵연료 개발을 위한 기술 개발을 웨스팅하우스사(영국 BNFL 소유)와 공동으로 정부의 기술 개발 기금을 지원받아 추진중이다.

한국 표준형 원자력 발전용 개량 핵연료 PLUS-7 개발은 1999년부터 시작하여 2002년 12월 시범 집합체 4다발을 올진 3호기에 장전하여 시험 연소중에 있으며, 2005년 말까지 정부의 인허가를 받아 2006년부터 상용 공급 예정이다.

웨스팅하우스형 원전용 개량 연료 NGF의 개발은 2001년 시작하여 2005년도에 시범 집합체를 장전하고, 2007년까지 정부의 인허가를 받아 2008년부터 상용 공급할 계획으로 연구 개발을 추진하고 있다.

PLUS-7 과 NGF의 주요 개선



내용은 지지 격자의 설계 개선으로 열적 여유도를 향상시키고, 기계적 건전성을 향상시키며, 지지 격자의 강도를 강화하여 내진 강도를 높이며, 영역 평균 연소도를 55,000 MWD/MTU까지 높이는 것이다.

PLUS-7 이나 NGF 상용 공급 시 연소도 증가 등으로 주기당 최소 10억 이상 경제적 이익이 예상되며, 열적 여유도가 향상되어 안전성이 증가됨은 물론 추가 여유도를 활용하여 원자력발전소의 출력을 증강할 때 유리하다.

그 동안 축적된 기술을 바탕으로 핵연료 피복관을 제외한 핵연료 부품을 전량 국산화하였으며 일부 부품을 해외 수출하고 있다. 인력도 해외에 수출하고 있다.

핵연료 피복관 국산화는 1단계로 정부의 지원을 받아 한전원자력연료주식회사가 주축이 되어 산·학·연 공동으로 기술을 개발하며, 그 기술을 바탕으로 2009년 국산화할 예정이다.

우리 나라 경수로 원자력발전소는 웨스팅하우스에서 도입한 웨스팅하우스형 원자로와 ABB-CE에서 도입한 한국형 원자력발전소가 있으며, 각 원자로에 공급하는 핵연료를 설계하는 컴퓨터 코드를 별도로 도입하여 이원화 시스템을 유지하고 있다.

미국 웨스팅하우스와 ABB-CE가 영국 BNFL에 흡수되어 동일 회

사가 되었으며, 신설 웨스팅하우스는 이원화된 컴퓨터 코드를 일원화하기 위한 연구를 하고 있고, 한전 원자력연료주식회사는 웨스팅하우스와 공동으로 설계 코드의 통합을 추진하고 있다.

PLUS-7과 NGF 다음 세대의 개량 연료 개발을 위한 개념을 정립하고 있으며, 우리 고유의 기술 확보를 위한 계획도 추진중이다.

핵연료 서비스 기술의 자립을 위한 연구도 병행하여, 손상 연료의 검사 및 수리 기술을 확보하고, 핵연료 손상 원인 규명을 위한 정밀 측정 기술도 개발중이다.

중수로의 경우 원자력연구소는 캐나다 AECL과 공동으로 CANFLEX 연료를 개발하고 있다. 선출력을 감소하여 안전성을 높이기 위하여 현 다발당 37봉 핵연료의 설계를 바꿔 다발당 43 연료 CANFLEX를 개발하여 시제품을 월성 원자력발전소에 장전한 바 있다.

맺는 말

세계 핵연료 성형 가공 분야는 웨스팅하우스(미국 웨스팅하우스와 ABB-CE를 영국 BNFL사가 구입 통합)와 프라마툼 ANP(프랑스 프라마툼과 독일 SIMENS-KWU의 합작 회사) 2대 메이저로 통합되어 세계 시장 쟁탈전을 벌이고 있으며, 시장에서 살아남기 위한 기술 개발

에 많은 투자를 하고 있다.

최초의 상용 원자력 발전을 시작한 지 이제 50년이 되었다. 그 동안 품질이 보장된 안전한 핵연료를 개발하기 위하여 핵연료 파손 메커니즘을 종합 분석하여 파손의 원인을 규명하고 그 대책을 수립하여 핵연료의 성능이 많이 개선되어 있으나 아직도 이물질 등에 의한 파손의 사례가 발생하고 있어 그에 대한 대책을 반영한 핵연료 설계개선은 계속되고 있으며, 핵연료 경제성과 핵비확산성을 제고하기 위한 노력도 계속되고 있다.

한전원자력연료주식회사는 북한에 건설중인 KEDO 원전을 포함하여 우리 나라 국내 수요의 전량을 공급하고 있으며, 국제 경쟁력이 있는 연료를 국내 시장에 공급하기 위하여 원가 절감과 기술 개발에 박차를 가하고 있다.

핵연료 기술 개발에 많은 투자비가 소요되므로 기술 개발에 국제 협력을 모색하여 웨스팅하우스와는 PLUS-7과 NGF를 공동 개발하고 있으며, 프라마툼과는 양해 각서를 체결하여 기술 제휴를 하고 있다.

핵연료는 화석 연료를 대체할 수 있는 준국산 에너지이다. 정부는 에너지 자립의 차원에서 핵연료 기술 개발에 많은 지원을 하고 있으며 산·학·연이 합심하여 우리 기술 확보에 노력해야 할 것이다. ☞