

고리1호기 델타60형 증기발생기용 랜싱 장비 개발 및 현장 적용

Development and Application of the Lancing System of Delta-60 Steam Generator - Kori Nuclear Power Plant Unit #1

정우태, 한덕윤, 안남성, 조병학, 홍영완

한국전력공사/전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소의 증기발생기 내에 침적되는 침전물을 제거하기 위하여 고압수를 이용한 랜싱 장비를 개발하여 고리1호기 증기발생기의 랜싱에 활용하였다. 증기발생기 랜싱 장비를 설치하는 지역은 고 방사능 구역이므로 장비를 구성하는 모든 부품이 내 방사능 부품으로 구성하였으며, 고압수 분사로 인하여 정밀하게 제어되는 랜싱 로봇의 오동작이 일어나지 않도록 방수 설계에도 유의하였다. 장비의 설치 및 제거시에 작업 종사자의 방사선 피폭 선량을 최소화하기 위하여 설치 및 정비가 용이하도록 장비 설계에 유의하였다. 고압 분사 노즐의 경우 특수 재질을 사용하여 가공한 다음 특별히 지정한 열처리 공정을 통해 높은 경도를 갖도록 하여 초 고압으로 장시간 물을 분사시에도 노즐의 마모가 서서히 진행되도록 하였다. 장비 개발 후 '01년 10월 고리원자력 발전소 1호기 델타60형 증기발생기를 대상으로 랜싱 작업을 수행한 결과 그 성능이 우수함을 입증하였다.

Abstract

A lancing system for removing the deposits on the tube sheet of a nuclear steam generator using high pressure water was developed and applied to Kori Nuclear Power Plant (NPP) Unit #1. As the place where the lancing system is to be installed is relatively high radioactive area, every part consisting the equipment is carefully selected to be radiation resistant. The lancing robot was designed to be water proof to avoid possible malfunction of the lancing robot because of high pressure water. To minimize radiation exposure to operators, the system was designed considering easy installation and maintenance in mind. Water ejection nozzle are designed to have high strength with special material and heat treatment so as to lessen abrasion caused by high pressure ejection. The lancing system showed good performance during the on-site lancing using the system for Delta-60 steam generator of Kori NPP #1 in October 2000.

1. 서 론

'99. 4월, 한국전력공사 전력연구원에서는 국내원자력발전소 증기발생기의 랜싱을 위한 장비 개발에 착수하였다. 개발에 착수하게 된 직접적인 동기는 당시 고리1호기 증기발전소의 증기발생기

를 모델 F에서 델타60형으로 교체함에 따라 기 사용 중이던 랜싱 장비인 CECIL 1호기를 사용할 수 없게되었고, 경제 여건의 악화로 인하여 장비 도입도 여의치 않았기 때문이다. 전력연구원에서는 기존 장비 분석, 현장 여건 조사, 개발에 필요한 요소 기술 조사를 통해 충분히 국산 개발 성공 가능성이 있으며, 연구개발 경제성도 충분하다는 판단을 하고 개발 팀 구성, 예산 확보 등의 과정을 거쳐 본격적인 개발에 착수하였다. 외국에서는 10년 이상의 개발 및 실험 과정을 거쳐 개발에 성공하였으나, 전력연구원에서는 '00년 10월에 모든 개발 및 시험을 완료하고 현장에 실제로 투입하여야 한다는 것이 목표였다. '00년 10월에는 영광2호기 예방정비도 동시에 추진될 예정이어서 장비 개발에 성공하지 못하면 랜싱 작업 자체를 하지 못할 수도 있다는 것이 어려움이자 동시에 기획였다. 국내 기술을 믿으려고 하지 않는 여건상 이 장비를 사용하지 않아도 된다는 대안이 있다면 개발을 끝내놓고도 현장 투입을 하지 못하는 상황도 발생할 수 있기 때문이다. 또 한가지 장애 요인은 자체적으로 해결하기 어려운 기술을 외국에서 도입하기가 용이하지 않다는 것이었다. 몇몇 외국회사에서는 랜싱 장비를 개발하여 놓고도 장비 구입 비용으로 수십억원을 요구하고 있어서 적은 돈으로 핵심 기술을 이전해 주지 않을 것이 자명하였기 때문이다. 따라서 과제 팀은 모든 기술을 자체적으로 해결하기 위하여 국내 전문가 자문, 랜싱 작업 실무자 자문 등을 이용하였다. 본 논문을 통해 어렵게 기술 개발 및 현장 투입에 성공한 경험을 같은 원자력계에 종사하고 계신 많은 분들과 나누고자 한다. 논문 전반부에서는 국내 랜싱 장비 현황을 살펴보고 후반부에서는 고리1호기 델타60형 증기발생기 랜싱 작업을 위하여 개발된 KALANS(Kepco Advanced LANcing System) 및 현장 적용 과정에 관하여 기술코자 한다.

2. 본 론

가. 국내 랜싱 장비 현황 및 특성

'2001년 3월 현재 국내에는 자체개발한 고리1호기용 KALANS(Kepco Advanced LANsing System), 고리2,3,4호기 및 영광1,2호기용 CECIL 1호기, 울진1,2호기용 CECIL 2호기, 영광3,4호기용 ABB-CENO 장비, Booy Clean 등 모두 다섯 가지 랜싱 장비가 활용되고 있다.

KALANS는 한국전력공사 전력연구원에서 자체적으로 개발한 장비로서 고리 1호기 랜싱을 목적으로 개발하였으나 노즐부 및 제어계통 등 일부 수정을 거쳐 고리2,3,4호기 및 영광 1,2호기에도 사용할 수 있도록 보완 작업이 추진되고 있어서 빠르면 '2001년 5월 중에 고리2호기 랜싱에도 활용할 예정이다.

CECIL 1호기는 고리원자력 2발전소 화학부에서 관리하고 있으며, 1996년 4월경에 도입하였다. CECIL 장비는 1986년 미국 전력업계의 필요에 따라 미국전력연구소(EPRI) 주도로 ESEERCO(Empire State Electric Energy Research Corporation), Con Edison (Consolidated Edison Company of New York) 등이 공동으로 개발하였다. 우리 공사에서 도입한 CECIL 1호기는 CECIL-4 의 기능 중 이물질 제거 기능이 제외된 것으로 배럴(barrel) 분사, 고착슬러지 제거, 이물질 검사 등에 활용하고 있다. 현재 CECIL 장비의 특허권은 EPRI가 보유하고 있으나 전용실시권은 미국 포스트밀러사에서 가지고 있다. CECIL 2호기는 울진1,2호기 랜싱을 위하여 2001년 2월에 도입한 장비로서 증기발생기 2차계통 작업구 내부가 유량분배판으로 아래위로 나누어져 있어서 랜싱 장비를 설치할 공간이 매우 협소한 문제점을 해결하기 위하여 새롭게 설계/제작되었다. 장치를 작게 만들기 위하여 모터를 증기발생기 밖에 설치토록 하였으며, 레일도 일부 단면이 증기발생기 작업구 윗부분 보다 위로 올라가 장착되도록 고안되었다. 전체적으로 보아 호스 및 케이블 승강 계통은 같으나 배럴 분사 장치와 고착 슬러지 제거 장치를 별도로 제작하여 장비의 크기를 줄인 것이 CECIL 1호기와 다르다.

ABB-CENO 장비는 ABB-CE에서 개발한 장비로서 한국표준형 원전인 영광3,4호기와 울진3,4

호기의 랜싱 작업에 활용하고 있다. 한국표준형 원전의 증기발생기의 경우 전열관이 삼각형 모양으로 배열되어 있어서 장비를 증기발생기의 원형으로 된 외곽 가장자리 쪽으로 투입하여 노즐이 전열관 사이로 향하게 조정한 다음 고압수를 분사하여 슬러지를 제거하는 방식을 사용한다. 이 방식은 장비 이동, 노즐 정렬 등 모든 작업을 수작업에 의존하므로 작업자의 방사선 피폭량이 상대적으로 많다는 단점이 있으나, 장비가 비교적 간단하여 정비가 용이하다는 장점도 있다.

Booy Clean 장비는 가장 오래된 장비로서 가장 기능적으로 단순하지만 여타 랜싱 장비가 고장 등으로 인하여 사용할 수 없을 때 대체장비로서 가끔 활용되고 있다. 여러 가지 최신 기능을 가진 자동화된 랜싱 장비의 도입 및 개발로 인하여 이 장비는 향후 거의 사용되지 않을 것으로 보인다.

‘2000년 3월 현재 한국전력공사에서 활용하고 있는 랜싱 장비를 요약하면 다음 표와 같다.

모델명	제작사	개발 혹은 도입 시기	배럴 분사	고형 슬러지 제거	관리부서	활용 발전소	증기발생기 유형
KALANS	전력연구원	2000. 10	○	×	고리1발전소	고리 1,2,3,4 영광1,2	웨스팅하우스 델타-60 모델 F
CECIL 1호기	Foster-Miller Co.	1996. 4	○	○	고리2발전소	고리2,3,4 영광1,2	웨스팅하우스 모델 F
CECIL 2호기	Foster-Miller Co.	2001. 2	○	○	울진1발전소	울진1,2	프라마툼
ABB-CENO	ABB-CE	1996.12	○	×	영광2발전소	영광3,4 울진3,4	ABB-CE
Booy Clean	Booy Clean (벨기에)	1987.	○	×	영광1발전소	고리 1,2,3,4 영광 1,2 울진 1,2	웨스팅하우스 델타-60 모델 F 프라마툼

나. 델타60형 랜싱 장비 개발

○ 랜싱 로봇 시스템 설계/제작

랜싱 장비 설계에 있어서 가장 중요시한 점은 안전성이다. 안전성 측면에서 장비 설계시 고려한 요건들은 1) 어떠한 경우에도 장비가 증기발생기 내부에서 고장이나 외부로 꺼낼 수 없는 상황이 발생하여서는 안됨, 2) 고압수가 분사될 때 증기발생기 전열관에 수직으로 분사되어 전열관에 구멍이 생기는 일이 없어야 함, 3) 장비 구성 부품이 장비에서 분리되어 증기발생기 내부에 이물질로 남는 경우가 없어야 함, 4) 고압수를 분사하여도 서보모터 등 정밀 제어 장비의 작동에는 문제가 발생하지 않아야 한다는 것 등이었다. 증기발생기 내부에서 장비가 고장이 나더라도 꺼낼 수 있도록 하기 위하여 특수한 안전 장치를 고안하고 특수 공구를 제작하였다. 랜싱 로봇은 두 대의 서보 모터와 기어, 스프링 등 수많은 부품으로 구성되어 있는데 로봇을 움직이는 구동 모터의 경우 큰 힘을 내기 위하여 감속비가 989:1이나 된다. 따라서 구동시에 큰 힘을 낼 수 있다는 것은 좋으나, 고장 시에 아무리 큰 힘으로 로봇을 당겨도 로봇이 랙기어에 물려 움직이지 않는 경우가 발생한다. 따라서 갑작스런 정전 및 고장 시에 로봇을 증기발생기 밖으로 제거하기 위하여 특별한 장치가 필요하다. 본 시스템에서는 90도 방향으로 동력을 전달하기 위하여 사용한 쌍의 베벨 기어가 서로 분리될 수 있는 구조로 하여 이 문제를 해결하였다.

○ 노즐 개발

장비 개발에 있어서 기술적으로 가장 어려운 분야의 하나가 노즐 설계이다. 노즐 설계 기본 개념은 출구에서 분사되는 고압, 고속의 분출수가 작은 입자 형태로 나누어져 안개처럼 되지 않고 멀리 떨어져 있는 슬러지에 강한 운동에너지를 전달하여 슬러지가 증기발생기의 가장자리 쪽으로 이동되도록 하는 것이다. 이를 위하여 노즐 내부 형상을 특수하게 설계하였으며 가장 적합한 노즐 형상을 찾기 위하여 여러 가지 형상의 노즐을 만들어 고압 분사 실험을 수행하였다. 실험 결과 노즐의 형상은 입구 쪽이 넓고 출구쪽으로 갈수록 점점 좁아지며, 좁아지는 각도가 7도인 노즐이 가장 퍼짐이 적은 노즐로 선정되었다.

노즐 설계에 있어서 또 하나의 중요한 인자는 노즐 표면의 경도이다. 노즐은 물을 분사하는 데 사용되므로 녹슬지 않는 재질로 되어 있으면서 경도가 높을 필요가 있다. 따라서 스테인레스 강 계열이면서 열처리를 통해 경도를 올릴 수 있는 특수 재질을 선정하여 사용하였다. 열처리 방법 또한 특별히 지정한 절차에 따르도록 하여 물 속에 함유된 입자들로 인한 마모를 줄일 수 있도록 하였다.

초속 200미터 이상의 빠른 속도로 방출되는 분출수는 여러 가지 요인으로 인하여 분무 형태로 진행됨을 관찰하였다. 물이 빠른 속도로 노즐에서 분사될 때 노즐 주변의 공기도 같이 흡입하면서 나아가므로 노즐 출구부분의 형상이 분무화 정도에 많은 영향을 미침을 관찰할 수 있었다. 노즐 출구 부분은 경면으로 가공하여 미세한 가공 결함으로 인하여 분출수가 몇 부분으로 나누어 진행되는 등의 결함을 방지하였다.

○ 제어 및 감시계통 개발

KALANS 장비의 제어계통은 윈도우환경을 기반으로 하는 최근의 동향에 따라 모든 프로그램을 Visual C++ 환경하에서 개발하였다. 제어 시스템은 두 대의 서보 모터를 제어하도록 구성하였으며, 조작 장치는 조이스틱 형태로 설계하여 작업편의성을 도모하였다. 예측하지 못한 상황에서도 증기발생기 내부에 투입된 랜싱 로봇으로 인한 사고가 일어나지 않도록 하기 위하여 서보 모터에 공급되는 전류를 실시간으로 감시하고 있다가 기준치 이상으로 전류가 공급되면 자동으로 전원 공급이 차단되게 하였다. 컴퓨터 화면에는 현재 작업 진행 상황을 가상현실 형태로 3차원 그림으로 보여주도록 하였으며, 별도의 아날로그 모니터에는 내시경에서 전달된 화상 신호를 나타내게 하였다. 따라서 컴퓨터 모니터상의 3차원 그림과 아날로그 모니터 상의 실제 영상이 일치되는 지 가끔 감시하여 기기의 이상을 조기에 발견할 수 있도록 하였다. 랜싱 로봇 내부에는 소리 감지 센서를 부착하여 기어, 모터 등 기계부품의 오동작 여부, 고압수 분사 상태, 기기의 충돌 여부 등을 작업자가 소리로 감지할 수 있도록 하였다. 이렇게 다양한 안전 장치를 준비한 이유는 증기발생기 내부에서 고압수가 전열관에 수직으로 장시간 분사되어 마모로 인해 전열관에 구멍이 생기는 최악의 상황을 피하기 위해서이다. 또한 최악의 경우 장비가 제어 불능이 되더라도 이로 인해 사고가 발생하지 않도록 유의하였다.

○ 슬러지 처리계통 개발

슬러지 처리 계통은 크게 1) 흡입 펌프, 2) 정화 계통, 3) 가압 계통, 4) 펌프 제어 계통, 5) 흡입 노즐, 6) 저장 탱크 및 배관 등으로 구성되어 있다. 흡입 펌프는 증기발생기 인근에 설치되어 증기발생기 내부에 장착된 흡입 노즐로부터 흡입된 슬러지를 정화계통으로 보내주는 기능을 한다. 이물질, 공기 등이 흡입되어도 무리 없이 보낼 수 있도록 하기 위하여 흡입 펌프는 공기압 이용 방식의 펌프를 사용하였다. 흡입 펌프에 의해 정화계통으로 보내진 슬러지는 10미크론 백필터(bag filter) 및 2미크론 카트리지필터(cartridge filter)를 통과하면서 정화되어 가압계통으로 보

내진다. 10미크론 및 2미크론 필터 하우징은 각각 두 셀이 설치되어 운전중에 필터 교체가 가능하도록 하였다. 또한 필터 전후단에는 투명창을 설치하여 정화되기 전후의 물의 탁도를 항상 관찰할 수 있도록 하였다. 가압계통은 460기압 및 720기압의 두 대의 피스톤 펌프로 구성되어 정화된 물을 고압으로 다시 증기발생기 내부로 보낸다. 이렇게 슬러지를 흡입하여 정화시킨 후 증기발생기 내부로 다시 보내는 순환 과정을 통해 침적물이 제거된다.

다. 현장 적용 및 결과 분석

‘2000년 9월, 모든 개발을 끝내고 전력연구원에서는 랜싱작업을 실제 수행할 한전기공 작업자들을 불러 장비 운전자 훈련을 실시하고, 10월에는 고리1호기 현장으로 모든 장비를 이동시켜 연속운전 및 장비 점검에 착수하였다. ’2000년 10월 15일 고리1호기 발전소가 예방정비를 위해 정지되고 이어서 19일 장비는 랜싱을 위해 증기발생기 인근으로 이동시켰다. 이로서 약 2주간에 걸쳐 국내에서 처음으로 개발된 장비를 이용한 랜싱 작업에 착수하였다.

장비 투입 후 한전기공 작업팀과 전력연구원 개발팀은 자체 개발한 장비가 증기발생기 작업구에 정확하게 장착 가능한지, 증기발생기 내부에 투입되는 레일은 문제없이 설치되는지, 로봇은 레일을 따라 이상 없이 주행할 수 있는지, 로봇 주행에 따라 케이블 및 고압 호스는 정상적으로 작동하는지 등 수많은 사항들을 점검하였다. 여러 가지 문제점들이 나타났지만 자체 설계를 통한 개발이었기 때문에 바로바로 문제점은 해결할 수 있었다. 문제점 중 한 가지를 예로 들면, 증기발생기를 감싸고 있는 단열재로 인하여 연구팀에서 제작한 별도의 플랜지를 증기발생기 작업구에 부착할 수 없다는 것이었다. 증기발생기 목업(Mock-up)을 이용한 시운전 시에는 전혀 알 수 없었던 문제점이었다. 과제팀은 계속 작업 현장에 대기하면서 발생하는 현장 문제점들을 신속하게 해결함으로써 모든 작업 준비를 성공적으로 끝낼 수 있었다.

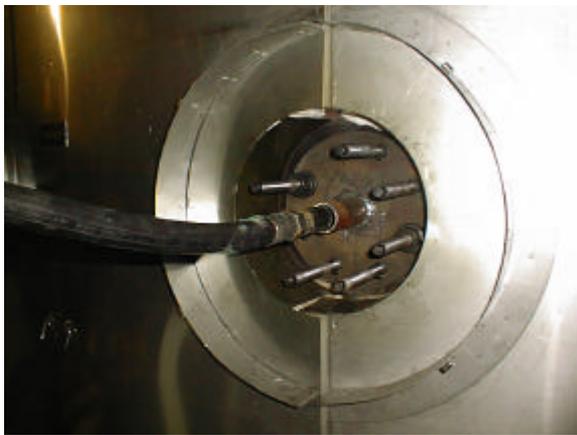


사진1 슬러지 콜렉터에 연결된 고압 호스

고리1호기에는 증기발생기가 2기 있으며, 랜싱 작업은 증기발생기 상부 슬러지 콜렉터(collector) 세정 작업과 하부 튜브시트(tube sheet) 랜싱 작업으로 나뉘어진다. 먼저 슬러지 콜렉터 세정 작업부터 착수하였다(사진1). 별도 제작한 연결부를 통해 콜렉터에 10기압 정도의 물을 보내면서 슬러지를 흡입하여 정화계통으로 보내니 정화계통 전단의 투시창에 시커먼 슬러지가 흡입됨을 확인할 수 있었다. 약 하루동안 이 작업을 계속적으로 수행하여 상부 세정 작업을 완료하였다.

다음날 증기발생기 아래 부분으로 장비를 옮겨 하부 튜브시트 랜싱 작업에 착수하였다. 그러나 작업 도중 아주 심각한 문제가 발생하였다. 장비의 눈이라고 할 수 있는 내시경에 이상이 생긴 것이다. 장비 제어실에서 내시경을 통해 입력되는 화면만으로는 장비의 위치를 제대로 파악할 수 없었다. 장비 특성상 전열관의 위치를 내시경으로 보면서 초기 위치를 설정토록 되어 있었으므로 이 문제는 더 이상 작업을 진행할 수 없는 심각한 상황이었다. 성공적인 개발과 현장 적용을 바로 눈앞에 두고 포기할 수 밖에 없는 상황이 벌어진 것이다. 내시경은 매우 고가여서 비용을 줄이기 위해 예비품을 마련치 못한 것이 큰 실수였다. 그 동안 투입된 노력과 예산을 생각하면 여기서 현장 적용을 포기할 수는 없어 그 시점에서 연구팀이 할 수 있는 최선을 다하기로 결정하였다. 전력연구원내 내시경 보유 부서, 한국중공업, 내시경 판매 업체 등 이용 가능한 모든 인적 네트워크를 다 동원하였다. 다행히 한국중공업에서 내시경을 몇 일 빌려주겠다고 하여 나섰

다. 연구팀에서 이것 저것을 가릴 상황이 아니었다. 일단 한국중공업 내시경을 빌려와 장비에 장착하였다. 랜싱 장비 운전은 가능하였으나 길이가 짧아 전열관 전체 영역을 세정할 수 없었으며, 화질 또한 나빴다. 그런데 다행스럽게도 한 내시경 업체에서 자기들이 보유한 내시경을 가지고 오겠다고 나섰다. 그날 밤 늦게 내시경 업체에서 가져온 내시경을 시험해 본 결과 우리 장비에는 꼭 적합하다는 결론을 내리고 바로 구입하였다.

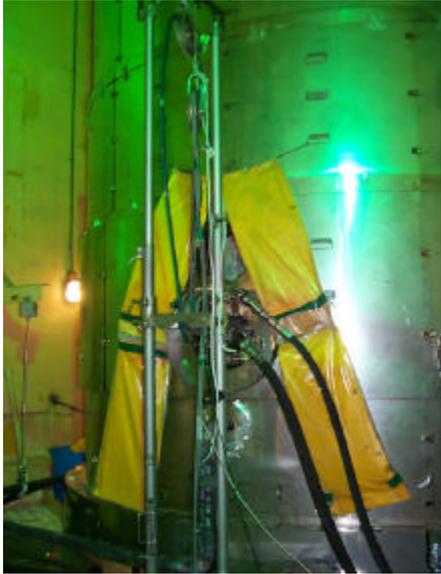


사진2 KALANS가 설치된
고리1호기 증기발생기

다음날 새롭게 구입한 내시경을 장비에 장착하고 랜싱 작업에 착수하였다. 제어실에서 관찰되는 화면은 완벽하였다. 새 내시경은 CCD 타입으로서 해상도가 월등하고 기존 내시경과는 달리 화면이 모니터 전체에 내시경 화면이 나와서 작업하기에는 아주 좋았다. 이 내시경이 장비에 장착되고 나서는 모든 작업이 계획대로, 아니 계획보다 더 순조롭게 착착 진행되었다. 과제팀에서는 슬러지 처리계통으로 흡입되는 시커먼 흡입수가 깨끗하게 정화되어 다시 증기발생기 내부로 공급되는 것을 지켜보면서 마음의 여유를 가질 수 있었다.

사진2는 고리1호기 증기발생기에 랜싱 장비를 설치한 모습이다.

3. 결 론

국내에서는 처음으로 원자력발전소 1차계통 내의 증기발생기 랜싱 장비를 개발하여 고리1호기를 대상으로 한 현장 적용에 성공하였다. 안전을 최우선으로 할 수 밖에 없는 까다로운 원자력계에서 순수한 국내 기술로 여러 가지 기술이 복합적으로 적용되는 정밀 장비를 개발하여 현장에 적용하기까지 모든 과정을 단기간에 이루어 낼 수 있었던 것은 국내의 설계기술, 부품 가공 기술, 열처리 기술, 제어 시스템 및 소프트웨어 개발 기술 등이 이미 수준급에 와 있다는 증거이기도 하다.

그 동안 원자력계에서 여러 가지 장비 개발을 위한 시도가 있었으나 대부분 2차계통에 사용되는 장비이거나, 일부 부품에 국한되어 종합적인 시스템으로 개발되어 1차계통에 사용되는 경우는 거의 찾아보기 어려웠다. 이번 랜싱장비의 성공적인 개발을 계기로 삼아 원자력계에도 보다 낮은 가격에 경쟁력이 있는 장비를 개발 투입하여 발전단가 인하에 기여하는 노력이 배가되기를 기대한다.

‘2001년 3월 현재 개발팀에서는 고리1호기 랜싱을 위해 개발된 KALANS 장비를 고리2,3,4호기는 물론 영광1,2호기까지 사용할 수 있도록 기능을 확장하는 작업을 수행하고 있으며, ‘2001년 8월부터는 울진3,4호기 및 영광1,2호기용 랜싱 장비의 개발에 착수할 계획이다. 이 과제가 완료되는 몇 년 후에는 국내 랜싱 장비는 모두 자체적으로 개발하여 관리하게 될 것으로 기대되며, 해외 수출을 통한 외화 획득도 가능하게 될 것이다.