



## 러시아 벨로야르스크 고속로의 기술적 발전

러시아가 차세대 원자로 기술로 건설한 나트륨 냉각 방식 BN-800 고속로의 상업적 가동이 임박함에 따라 러시아가 핵연료를 재사용하는 밀폐 사이클 문제를 해결하면서 이루어내고 있는 최근의 기술적 진보에 대해 살펴보았다.

미국, 프랑스, 영국, 독일, 일본, 인도 등 원자력 발전 산업에서 주도적 위치를 선점하려던 모든 주요 원전 보유국들은 1950년대부터 고속로 개발 작업을 시작했으며 나중에 한국과 중국도 개발에 뛰어들었으나 결국 그 어느 나라보다 러시아가 가장 앞선 기술적 진보를 이루어 내게 되었다.

최초의 고속로 설계는 1949년 당시 소련에서 시작되었고, 1955년 옴닌스크(Obninsk)에 있는 물리전력기술연구소(IPPEP)에 BR-1 zero 고속로가 건설되어 가동에 들어갔다. 1959년에는 규모가 커진 BR-5의 건설이 시작되어 첫 번째 나트륨냉각 원자로의 시험대 역할을 하게 되었고, 이 원자로는 나중에 발전량이 8MW 급으로 격상되어 BR-10로 알려진 원자로가 되었다. 1969년에는 울리야노프스크(Ulyanovsk) 인근 디미트로프그라드(Dimitrograd)에 있는 원자로연구소(RIOR)에서 발전 용량 60MWe짜리 BOR-60 고속로가 건설되었다.

연구소들이 실행한 이런 연구를 기반으로 카자흐스탄의 BN-350 고속로와 벨로야르스크의 BN-600 고속로 등이 가동될 수 있었던 것이다.

현재 러시아에서 상업적으로 가동되고 있는 나트륨냉각 고속로는 벨로야르스크(Beloyarsk) 원전의 BN-600이 유일하다. 이 고속로는 지금까지 30년 가까이 가동되면

서 러시아 기술자들이 핵연료 밀폐 사이클 기술을 개발하는데 중요한 역할을 해주고 있다.

BN-600 고속로는 원자로와 일차 냉각 펌프가 대형 액체 나트륨 수조에 잠기도록 한 three-loop 설계로 되어 있는데 이차 냉각재 회로는 각 3개의 순환고리가 증기발생기와 이차 나트륨 펌프와 함께 구성되어 있다.

발생된 증기는 3기의 200NW 터빈으로 공급되는데 각 증기발생기는 증발기, 과열기, 재열기로 구성된 8부분으로 이루어져 있고 다기관으로 연결되지만 나트륨 구역과 증기 구역 양쪽으로 격리될 수도 있다.

BN-600 고속로는 가동되는 동안에도 지속적인 개선이 이루어져왔고 증기발생기, 나트륨 펌프, 중간 열교환기 등 핵심 부품의 수명도 계속 연장되어 온 결과 지난 2010년 4월 러시아 원자력규제 당국인 Rostekhnadzor는 벨로야르스크 3호기 원자로의 가동 연한을 2020년 3월 31일까지 연장하도록 허가했다. 이 허가 절차가 진행되는 동안 45년으로 정해진 부품의 가동수명 대한 연구 조사도 이루어졌는데 5년의 추가적 연장 사용 허가도 가능할 것으로 보인다.

최근 러시아의 차세대 나트륨냉각고속로인 벨로야르스크 원전 4호기 BN-800의 건설이 완료됨에 따라 새로운 이정표를 세우게 되었다. BN-800 고속로의 건설 계



러시아 Beloyarsk 원전

획이 1984년에 시작되면서 더 큰 BN-1600 고속로의 건설계획도 1992년을 목표로 시작됐으나 1986년 우크라이나에서 발생한 체르노빌 원전 사고로 러시아의 새로운 원전 건설은 모두 중단되고 말았다.

그 이후 소련의 붕괴에 뒤따른 경제난으로 인해 1990년대에도 건설 공사는 계속 지연되었다. 그런데 이 기간 동안 원전에 대한 신뢰성, 안전성, 그리고 친환경적인 요구에 맞춰 개정된 규제 사항과 발전되는 기술 동향까지 감안하여 적용하게 된 덕분에 지연되고 있던 건설 프로젝트는 오히려 수준이 높아지게 되었고 2006년부터는 본격적 건설 공사가 다시 시작되었다.

벨로야르스크 원전 고속로의 건설 계약 수주사인 Uralenergostroy의 Viktor Saruda 사장은 벨로야르스크 4호기 건설을 “원전의 과거와 미래를 연결하는 다리”라고 표현했다.

새 고속로에는 BN-600을 뛰어 넘는 수많은 설계 및 기술적 개선 사항이 들어있는데 BN-800 고속로의 기본적인 특징은 나트륨 냉각 용액의 압력이 상실되는 사고가 발생하면 자동으로 작동되는 수동적 시스템과 더불어 능동적 원자로 보호시스템도 갖추고 있다는 것이

Rosenergoatom 측의 설명이다.

즉 정상으로 가동될 때에는 제어봉이 노심 상부의 냉각 용액에 떠있게 되지만 냉각 용액의 압력이 떨어지게 되면 제어봉이 수직 제어봉 채널 안으로 떨어져서 중성자를 흡수하게 됨으로써 연쇄 반응을 중지시킨다. 또한 수동적으로 작동되는 보조적 공기 냉각 시스템으로 잔류 붕괴열을 제거할 수도 있다.

BN-800 고속로의 물리적 시험 가동은 2015년 여름에 완료되었는데 789MWe급 발전 용량의 원자로는 7월 31일 최소 제어 전력(minimum controlled power)의 0.13%에 도달하였다. 이것은 2014년 말에 시작된 가동 계획상의 예정일보다 약 1년 빨리 최소 제어 전력에 처음 도달하게 된 것이다.

그러나 지난 12월 러시아원자력공사 Rosenergoatom은 이 원자로의 핵연료는 좀 더 개발할 필요가 있다고 발표하였다. 이 원자로는 2016년 말 이전에 상업적 가동에 들어갈 것으로 기대하고 있으며 Rosenergoatom 측은 지난 9월에 이 원전의 가동 허가에 대한 자체 수정 사항을 승인하고 시험 가동을 허용한 바 있다.

## 러시아 Brest 원자로의 핵연료 개발 현황

러시아 연료 회사인 TVEL의 핵연료사업 부서 Mashinostroyelny Zavod는 지난 10월 Brest-OD-300 원자로에 사용될 실험적 핵연료집합체의 모형 ETVS-12DHK와 ETVS-13을 제작했다고 발표하였다. 이 Brest 원자로는 N A Dollezhal Research and Development Institute of Power engineering(NIKIET)이 개발한 납 냉각 방식의 고속로 시스템이다.

Brest 원자로 개발은 세베르스크의 합영 기업인 Siberian Chemical Combine이 주도하는 Proryv(Breakthrough : 돌파구) 프로젝트의 일부인데 ① 고속로용 핵연료인 농축 우라늄 및 플루토늄(nitride) 생산을 위한 연료 생산/재조립 모듈 ② Brest 원자로를 갖춘 원전 설비의 건설 ③ 사용한 연료를 재처리하는 모듈 등의 3단계로 사업이 진행되고 있다.

Proryv 프로젝트에 들어가는 비용은 1,020억루블(약16억 달러)에 달하는데 그 중에 세베르스크 원전 설비의 건설에 투입되는 금액은 64억 루블이다.

Proryv 프로젝트의 책임자인 Vyacheslav Pershukov에 따르면 Brest-300 고속로의 건설은 2016년 중에 시작될 예정이라고 한다. 첨단 기술로 생산되는 핵연료는 2017년도 안으로 시험 생산이 시작되고 테스트를 거쳐 실제 생산에 들어가 2020년부터 가동하도록 예정된 Brest-300 고속로에 공급될 것이다.

또 이 프로젝트는 2022년 핵연료의 일괄 가공 패키징 프로그램을 시작해 핵폐기물이 발생하지 않는 신기술을 확고히 정착시켜 핵연료의 밀폐 사이클을 실현해 보일 것으로 예상하고 있다.

Brest 원자로에 사용될 핵연료의 실물 모형은 AA Bochvar Research Institute of Inorganic Material(VNIIM)측과 OKBM, SCC 및 기타 유관기관들의 대표로 구성된 승인위원회의 요구에 의해 제작이 완료되었다. 한편 초기에 설계된 nitride 연료를 사용하는 기본형은 이미 벨로야르스크 원전의 BN-600 고속로에서 시험되고 있다.

## 향후 전망

러시아는 이미 훨씬 더 큰 1,200MWe급 5호기 원자로를 건설하여 벨로야르스크 원전을 확장하려는 생각을 하고 있다. 이 BN-1200 원자로의 설계를 맡아 진행중인 Afrikantov OKBM은 2017년까지 설계 작업을 완료할 예정이다. Rosenergoatom 측에 의하면 BN-800 원자로 부지에는 원자로 2기 건설을 위한 기본적인 인프라가 이미 갖춰진 상태이며 BN-800 원자로를 건설하는 과정에서 경험을 쌓은 건설 팀도 있기 때문에 5호기 원자로는 보다 쉽고 빠르게 건설될 수 있을 것이라고 밝혔다.

뿐만 아니라 켈레즈노고르스크에 있는 Rosatom의 합영 회사 MCC 부지의 지하 200m에 위치한 핵연료 제조 설비에서는 혼합 산화물 연료 MOX fuel의 제조가 이미 시작되었는데 이를 의뢰한 벨로야르스크 원전의 BN-800 원자로에 공급할 핵연료의 생산은 차질 없이 진행될

것이다. 지하에 있는 이 연료 제조 설비는 연간 400개의 핵연료집합체를 생산해낼 수 있게 설계되어 있다.

혼합 산화물 연료인 MOX fuel 제조용 플루토늄은 오제르스크에 있는 PA Mayak 플루토늄 재처리 생산조합이 공급을 맡고 우리늄은 MCC에서 공급하게 되는데 BN-800원자로의 핵연료집합체 생산에 필요한 나머지 부품들의 공급은 Mashinostroyelny Zavod 측에서 담당하기로 되어 있다.

이 핵연료 개발 프로그램에 따르면 BN-800원자로에 투입될 MOX-TV5 연료집합체의 생산을 약 400개까지 정를 증가시켜 2019년에는 완전히 바꾸어 장전하게 될 것으로 예상하고 있는데 BN-1200원자로에도 이 MOX fuel 혼합 산화물 핵연료를 사용하게 될 것으로 기대하고 있다. ☺

- 〈Nuclear Engineering International〉 Vol.60 No.736