



개선형 한국표준원전(KSNP+) BOP 유체 계통 설계 개선

박 홍 규

한국전력기술(주) 신고리 1·2호기 핵설계분야 책임자

현 재 건설중인 신고리 1·2호기 및 신월성 1·2호기에 최초로 적용하고 있는 개선형 한국표준원전(KSNP+)의 기본 설계 개념은 1998년 1월부터 2001년 10월까지 한수원이 발주한 설계 개선 사업 1, 2단계에서 정립되었으며, 설계 개선 3단계 과정인 신고리 1·2호기 본사업에서 KSNP+의 기본 및 상세 설계가 완성되어 가고 있다.

한국표준형원전(KSNP)의 국제 경쟁력 제고를 목표로 BOP 유체 계통 설계, 플랜트 배치 설계, 구조 설계, 전기/계측 설계 그리고 원자로 계통 설계 등 원전 설계 전반에 걸쳐 종합적인 설계 개선이 수행되었으며, BOP 유체 계통 설계 분야는 설계 특성상 타설계 분야에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 설계 개선을 주도하였으며 설계 개선 사업의 성공적 수행에 절대적으로 기여하였다.

필자는 설계 개선 사업 사전 준비

과정부터 1·2단계를 거쳐 신고리 1·2호기 본사업까지 BOP 유체 계통 설계 분야 책임자로서 설계 개선 개념 정립에 주도적으로 참여하였다. 다음은 필자가 참여하여 수행한 KSNP+ BOP 유체 계통 설계 개선 내용을 요약한 것이다.

설계 개선 사업 추진 배경

한국의 원전 산업계는 지속적인 기술 도입 및 개발로 한국표준형원전(KSNP)의 효시인 영광 3·4호기를 성공리에 완수하였고, 국내 기술진에 의해 개발된 표준화 사업 결과물을 올진 3·4호기에 전면적으로 반영함으로써 명실공히 1,000MWe급 한국표준형원전(KSNP) 설계 개념을 정립하였다.

그러나 체계적인 설계 개선없이 올진 3·4호기, 영광 5·6호기, 올진 5·6호기 등이 짧은 시차를 두고 연속적으로 건설되면서 KSNP의 반복 건설에 따른 사업비 절감

효과는 거의 한계에 도달하였고 또한 타전원에 대한 원전 발전 원가의 상대적 우위 확보가 위협을 받는 현실에 직면하게 되었다.

한편, 무한 경쟁 시대에 돌입한 최근의 국제적 경제 환경으로 원전 건설 또한 국내외적으로 치열한 경쟁을 피할 수가 없게 되었다.

따라서 지금까지 이룩한 기술 자립 능력과 건설 및 운전 경험을 바탕으로 부분적 설계 개선을 탈피하여 종합적인 설계 개선으로 KSNP의 기술성과 경제성을 제고하여 국제 경쟁력이 향상된 원전 설계·건설 모델의 수립이 필요하게 된 것이다.

설계 개선 사업 추진 목표 및 방법

국제 경쟁력을 갖는 KSNP+를 개발하기 위해 수립된 사업 추진 목표와 종합적인 설계 개선의 성공적 수행을 위해 시행된 방법은 아래와 같다.

○ 안전성 보장을 전제로 하는 경제성 향상 : KSNP의 기본적인 설계 개념 및 안전성을 유지하는 범위 내에서 설계를 개선하여 경제성 향상
 ○ 시공성·운전성 및 유지 보수성 향상 : 선행 KSNP의 운전 경험을 반영하여 시공성·운전성 및 유지 보수성 향상

○ 자립 기술을 기반으로 원전 설계 고도화 달성 : KSNP의 부분 설계 개선을 탈피하여 현재까지 축적되어 온 경험 기술을 바탕으로 전 설계 분야의 설계 개선을 추진하여 복제 및 모방 기술에서 독자 개발 기술을 확보

○ 원전 기술의 해외 수출 기반 확충 : 1,000MWe급 한국표준형원전의 국제 경쟁력 향상과 함께 해외 수출 기반 조성

설계 개선 사업은 전 설계 분야에 걸치는 설계 개선으로 인하여 개발에 많은 기간이 소요되므로 단계별 추진 계획을 수립하여 효율적인 사업 추진과 함께 설계 변경에 대한 심도 있는 검증 및 확인 업무를 수행하였다.

○ 설계 개선 1단계 사업 : 설계 개선 과제 채택

- 설계 개선 과제 선정
- 사업 적용성 평가
- 설계 개선 개념 정립
- 개선 효과 및 종합 경제성 평가 등

○ 설계 개선 2단계 사업 : 채택된

설계 개선 과제를 반영하여 신고리 1·2호기 적용을 전제로 기본 설계 개발(설계 개념 정립)

- 기본 설계 개발(설계 결과물 작성 : 일반 설계 기준서, 계통 설계 기준서, 설계 기준 도면, 계산서, P&ID, 계통 설명서 등)
- 개선 설계 시현성 검증
- 인허가 심사를 위한 기술 검토/협의
- 설계 개선 추가 과제 사업 적용성 검토

○ 설계 개선 3단계 사업 : 실제 사업에 반영, 기본 및 상세 설계 수행

- 신고리 1·2호기 종합 설계 용역을 통해 수행되며 예비 및 최종 안전성 분석 보고서 작성과 기본 및 상세 설계 등의 업무를 수행

설계 개선 1·2단계 사업은 사업주인 한수원이 사업 종합 관리를 하고 한기는 전반적인 기술 업무를 수행하며 여러 관련 기관 및 업체와의 다각적인 협조 체계를 구축하여 사업 추진의 효율성을 극대화하는 방향으로 운영하였다.

특히 한수원은 설계 개선 종합심의위원회를 구성 운영하여 사업 적용성 여부에 대한 종합적인 심의를 수행하였으며, 설계 개선 사업과 APR1400 사업간의 유사 기술에 대한 일관성 있는 기술 방향을 설정

하고 상호 참조 가능한 기술을 사전 도출하여 각기 설계에 적극 반영하기 위해 사업간 정기적인 기술 설명회를 개최하였고, 설계 개선 사항 중 안전성에 관련되거나 대폭적인 설계 변경이 수반되는 항목에 대해 규제 기관과의 실무 협의를 수행하여 향후 건설될 신규 원전의 인허가성 확보에 대비토록 하였다.

BOP 유체 계통 설계 개선 과제 및 설계 개선 내용

설계 개선 사업 1단계에서 BOP 유체 계통 설계 분야에서는 46개 과제(사업 전 분야 총 과제 수는 103건)에 대한 사업 적용성을 검토하여 조건부 채택 3건을 포함하여 42건이 채택되었으며, 2단계 사업에서 심층 검토, 재검토, 추가 과제 검토 등을 통해 51개 과제 중 채택 45건(4개 호기 옥외 공용 설비 포함), 불채택 4건, 삭제 2건으로 확정되었다.

이중 신고리 1·2호기에 적용하기로 최종 확정된 과제는 44건(4개 호기 공용 설비는 2개 호기 공용 설비로 변경하여 적용)이다.

BOP 유체 계통의 설계 개선을 위한 주요 설계 개념은 계통 구성의 최적 및 단순화, 기기 용량의 최적화 및 입증된 신기술을 적용하는 것이다.

주요 설계 개선 개념의 예를 들어



〈표 1〉 BOP 유체 계통 설계 개선 내용

과제 번호	제 목	설계 개선 내용
F01	내부 침수 설계 최적화	-보조 건물과 복합 건물에 대해 피동 침수 방호 개념 적용으로 침수위 최소화 (운전 보수성 향상을 위해 출입 통로 하향 조정과 콘크리트 Curb 제거 포함)
F02	SFP 정화 계통 최적화	-사용후연료 저장조 정화 계통 Skimmer Loop와 RCFS 제거 -Skimmer Suction을 기존 정화 계통에 연결
F03	복수 및 보조 급수 저장 탱크 분리	-안전성 관련 보조 급수 저장 탱크(50%×2대/호기)는 보조 건물내에 설치하고, 비안전성 관련 복수 저장 탱크(50%×3대/2개 호기)는 옥외에 설치함
F04	유체 계통 기기의 품질 등급 최적화	-비안전성 관련 설비이면서 안전 정지 지역에 설치되어 품질 등급 T로 상향 조정된 기기에 대하여 기기 특성 및 설치위치를 재검토하여 품질 등급을 재분류하고, R등급으로 분류된 기기에 대해서 발전소 이용률에 미치는 영향 및 경제성을 재평가하여 품질 등급 재분류함
F05	원자로 건물 살수 열교환기 삭제	-살수 열교환기를 제거하고 정지 냉각 열교환기를 공유하여 사고시 원자로 건물 열 제거 기능을 유지함
F06	1차 시료 채취 계통 설비 단순화	-정지 냉각 계통(SC) ESF Pumps Mini- flow Line의 시료 채취 기능과 CVCS 시료 채취용 펌프 삭제
F07	판형 열교환기 확대 적용	-전열 성능이 우수한 판형 열교환기를 CCW 및 SFPC 열교환기에 확대 적용
F08	터빈추기 증기와 보조 증기 Cross-Tie 배관 삭제	-터빈추기 증기 배관과 보조 증기 Cross-Tie 배관을 삭제하여, 발전소 기동 및 정지시에는 주증기 계통 또는 보조 보일러로부터 보조 증기를 공급하고, 발전소 정상 운전시에는 주증기 계통에서 보조 증기를 공급함
F09	취수 구조물 및 순환수 계통 설계 개선	-순환수 펌프 및 이동 스크린을 각각 25%×4대로 구성하고, 공동수로 채택 및 신고리 원전의 부지 조건(해수 온도 및 해수조위)을 고려한 취수 구조물 개선
F10	보조 증기 계통 응축수 수집 탱크 및 응축수 이송 펌프 삭제	-보조 보일러 가동시 보조 증기 응축수를 보조 보일러 탈기기로 직접 이송시키고, 기존 응축수 수집 탱크 및 응축수 이송 펌프를 삭제함
F11	급수 계통 설계 압력 조정	-주급수 펌프 토출측 배관 설계 압력을 구간별로 구분 적용하고, 터빈 밸브 전개 조건 열평형도상의 급수 유량 기준으로 적정 설계 기준 유속을 적용하여 배관 크기 최적화
F12	급수 펌프 구성 및 용량 조정	-터빈 구동 주급수 펌프 55%×3대로 구성하고 용량 최적화
F13	보조 보일러 용량 축소	-보조 보일러 용량을 세정/재순환 운전 모드시 탈기기 재순환 급수 온도(180°F) 유지에 소요되는 보조 증기량 기준으로 설계 개선
F14	1차측 기기 냉각수 계통 최적화	-열부하 재분배 및 계통 용량 최적화를 통해 유량 평형 유지 및 최저 온도를 만족하도록 비안전성 열부하의 공동 연결 설계 -각 계열은 100% 용량 펌프 2대와 50% 용량의 열교환기 3대로 구성되며 양 계열은 Common Loop로 상호 연결됨. 정상 운전시 양 계열 중 한 계열의 펌프 1대와 열교환기 2대 운전

과제 번호	제 목	설계 개선 내용
F15	터빈 건물 공조 방식 설계 개선	-부분적인 고온 현상을 해결하기 위해 지하층은 냉수를 이용한 냉방 방식 적용, 지상층·운전층 및 탈기기층은 외기 냉방 방식 적용, 지상층 이상의 국부 고온 지역(전기기실)은 냉수 냉방 방식 적용
F16	배관 두께 및 크기 재평가	-전체 배관을 대상으로 설계 기준 유속을 초과하지 않는 범위에서 펌프의 운전 비용 및 초기 구매 비용을 고려하여 허용 가능한 유속에서의 최적 배관 크기 결정
F17	공기중 방사능 제어 환기량 재검토	-10CFR 20.1204, 1502, 2106에 제시된 내부 피폭 감시 면제 기준인 0.1 DAC 및 작업자의 체류 시간을 고려한 환기량 결정 방법
F18	복수 및 복수 정화 계통 설계 개선	-계통 운전 모드를 고려하여 복수 펌프 용량, 복수 정화 설비 용량 및 관련 계통 설계 압력 최적화
F19	수처리 및 오폐수 처리 설비 4개 호기 공용화	-중간 집수조 및 관련 설비 삭제
F20	비방사성 기기 공작실 4개 호기 공용화	-4개 호기 공용으로 설치하여 부지 활용 극대화 및 경제성 향상 유도
F21	이산화탄소 저장 탱크 및 가스 증발기 양호기 공용화	-터빈 건물 사이 공간을 활용하여 양 호기 공용화 설계
F22	소방 펌프 및 청수 저장 탱크 4개 호기 공용화	-청수 저장 탱크는 2개 호기 공용으로 설계하고, 소방 펌프는 인접 후속 호기 (APR 1400)와의 공유화를 고려하여 설계
F24	증기발생기 취출 계통 최적화	-연속 및 고유량 취출 탱크 통합 설계 (고유량 취출 유량 조정 : 16.7% MSR → 5% MSR) -취출 계통의 비재생 열교환기 및 고유량 취출 이송 펌프 삭제
F25	보조 급수 계통 최적화	-보조 급수 펌프를 계열당 50% x 1대의 전동기 구동 펌프와 50% 50% x 1대의 터빈 구동 펌프로 구성하고, 계열간 보조급수 공급이 가능토록 계열간 상호 연결 배관 설치
F26	복수기 진공 계통 설계 개선	-증기식 공기 추출기를 삭제하고 복수기 공기 제거 설비를 33 1/3% 용량의 진공 펌프 4대로 구성
F27	보조 급수 계통 설계 압력 최적화	-보조 급수 펌프 토출측 설계 압력을 운전 특성을 고려하여 구간별로 최적화
F28	윤활유 원심 분리기 양호기 공용화	-윤활유 원심 분리기의 사용 빈도 및 건물 배치 특성을 고려하여 윤활유 원심 분리기를 양호기 공용화
F30	기동용 급수 펌프 용량 조정	-정격 급수 유량의 8% 기준에서 원자로 출력 5% 기준으로 펌프 용량 축소 설계
F31	주증기 및 급수 가열기 연계 계통 설계 개선	-급수 가열기 배수 계통 : 운전 모드를 고려하여 배관 크기 및 밸브 용량을 최적화하고, 배수 밸브 전단 Check Valve를 Swing Check Valve로 설계 -급수 가열기 배기 계통 : 급수 가열기 배기 용량을 급수 가열기 계열이 정상 운전시 배기 유량 기준으로 산정 -터빈 추기 증기 계통 : 추기 증기 Bleeder Trip Valve 배수 밸브 제어 방식 최적화 -주증기 계통 : 터빈 밸브 전개 조건 주증기 유량 및 허용차압과 배관 운전 조건을 고려하여 배관 크기 최적화



과제 번호	제 목	실 계 개 선 내 용
F32	보조 보일러 건물 삭제	-단순 옥외형 보조 보일러로 설계
F33	설계 기준 및 중대 사고시 수소 제어를 위한 Passive Autocatalytic Recombiner(PAR) 설치	-수소 재결합기 대신 각 호기별로 원자로 건물내에 PAR 설치 및 중대 사고시 수소 제어를 위해 수소 점화기를 설치하고 PAR가 수소 정화 기능을 가능한 지원하도록 최적 설계
F34	복합 건물 공조 계통 설계	-복합 건물을 청정 구역과 잠재적 공기 오염 가능성이 있는 지역으로 구분하여 별도의 배기 계통을 구성하며, 방사성 물질의 소외 방출을 가능한 한 적게 유지하면서 방사성 물질의 방출 모드를 단순화하고 공조 설비 운전/보수시 작업자 피폭량을 최소화할 수 있도록 공조 설비 배치 및 기기수 최적화
F36	발전소 냉수 계통 구성 및 용량 최적화	-안전성 관련 냉수 계통은 각 계열별 다중성을 확보한 100%×2대의 냉동기로 설계하고 각 계열간에 상호 연결 배관을 설치하며, 비안전성 관련 냉수 계통은 Service Boundary별로 50%×3대의 냉동기로 구성
F37	보조 건물, 핵연료 건물 및 옥외 건물 공조 계통 최적화	-건물 배치 특성에 따라 예비 기기 최적화, 공조기 공용화 및 효율적인 공조 방식 조합에 의한 계통 최적화
F38	주제어실 공조 계통 설비 개선	-주제어실 공기 조화기 토출측 공동 덕트의 역류 방지 댐퍼 변경(Check Damper 사용) -실내 온도 제어 방식 변경 : Electro-Hydraulic Actuator Multizone Damper에서 Manual Damper 방식으로 변경
F39	원자로 건물 공조 계통 구성 및 공조 방식 개선	-CEDM 냉각 방식은 AHU 방식에서 Cooling Fan 방식으로 변경(IHA에서 가능 수행) -RCFC에 연결된 공동 덕트 제거, 토출측에 필요한 최소한의 덕트만 설치하고 Recirculation Fan을 설치하여 냉방용 공기 유통성 확보 ● S/G Enclosure용 : 50%×4대 ● Annulus용 : 50%×4대
F40	공조 계통 덕트 제작 및 지지대 설계 개선	-기계식 이음 덕트는 내진 범주 II급이면서 두께 18 Ga인 덕트까지 확대 적용 - 내진 범주 III급 덕트의 경우, 덕트와 앵글의 부착 방법은 덕트 제작 방식에 관계없이 Rivet 또는 Screw 체결 방식 적용
F41	액체 방사성 폐기물 계통 설비 개선	-역삼투압 처리 설비 적용 및 계통 단순화 ● 여과 설비와 선택성 이온 교환 설비를 단일 Package화 ● 중간 탱크 및 펌프 등의 제거 ● 처리 폐액을 액체 또는 고체 방사성 폐기물 계통의 세정수 또는 폐수지 이송 용수로 사용
F42	기체 및 고체 방사성 폐기물 계통 설비 개선	-기체 방사성 폐기물 계통 단순화 : Header Drain Tank의 Surge 기능 제거 및 Package내의 전단 여과기 제거 -고체 방사성 폐기물 계통 : 폐수지 처리 방식 개선 및 필터 임시 저장 공간 확보
F44	2차측 대기 방출 배기관 통합	-2차측 대기 방출 배기관(복수기 대기 방출 배기관, 탈기기 대기 방출 배기관, 터빈 밀봉 증기 대기 방출 배기관)을 통합하여 방사선 감시기 수량 축소
F46	염소 주입 설비 4개호기 공용화	-인접 후속 후기(APR 1400)와의 공유화를 고려하여 Provision 및 Space 확보 -염소 주입 설비 구성 및 용량 최적화

과제 번호	제 목	설 계 개선 내용
F47	수처리 설비 구성 및 용량 최적화	-2개 호기 공용에서 4개 호기 공용으로 설계 -운전 모드를 고려한 배관 크기 최적화
F48	내진 범주 I급 소방 펌프 및 저장 탱크 양호기 공용화	-양호기 공용 설비로 구성하여 통합 건물인 복합 건물 내에 설치
F49	안전 정지 구역의 비안전 등급 설비 품질 등급 적정성 검토	-품질 등급 I 및 내진 범주 I 급에 대한 설계 기준을 재검토하여 안전 정지 구역내 비안전 등급 기기 배치 조건에 따라 품질 등급 완화
F50	공기 조화 설계 외기 조건 최적화	-부지 조건에 적합한 외기 설계 온도를 결정하여 공조 계통의 용량 최적화

보면, 1차측 기기 냉각수 계통의 양계열의 비안전성 열부하에 대한 Common Loop 개념 적용, 가연성 기체 제어 계통의 능동형 수소 재결합기를 피동 촉매형 수소 재결합기로 변경, 판형열 교환기의 확대 적용, 액체 방사성 폐기물 계통의 정화 설비를 원심 분리기에서 역삼투압 설비로 교체, 정상 운전중 주급수 펌프 3대가 동시 운전되도록 주급수 펌프 구성 변경, 계통 이용 불능도가 향상되도록 보조 급수 펌프 구성 개선 및 주 제어실 공조 계통의 설비 단순화 등을 들 수 있다.

채택된 BOP 유체 계통의 설계 개선 과제 번호, 과제명 및 설계 개선 내용은 <표 1>과 같다.

BOP 유체 계통별 설계 개선 개념

계통별 설계 개선 개념은 울진 5·6호기 설계를 참조하고 설계 개선 1, 2단계의 설계 개선 과제 사업 적용성 검토 결과, 1단계 설계 개선

과제의 조건 및 보완 사항을 재검토한 2단계의 심층 검토 결과, 1단계 설계 개선 과제에 대한 설계 시현성 검증 및 규제 기관 협의 등의 세부 업무를 통해서 정립, 확정된 개념을 근거로 개발되었다.

설계 기술간의 연계 특성으로 인하여 배치 설계 또는 원자로 계통 설계 등의 설계 개선 과제(LXX, NXX와 같이 과제번호 표기)의 설계 개선 개념도 BOP 유체 계통의 설계 개선에 추가적인 영향을 주었으며, 신고리 1·2호기 본 사업이 수행되면서 종합적이고 체계적으로 설계 개선 개념의 기본 및 상세 설계가 수행되는 과정에서 일부 설계 개념이 변경되기도 하였다.

<표 2>는 BOP 유체 계통 설계 개선 과제 사업 적용 타당성 검토 결과에 근거하여 기본 설계 개발 과정에서 정립된 주요 계통의 설계 개선 개념을 요약하여 울진 5·6호기와 비교하여 보여준다.

일부 설계 개선 개념은 기본 설계

개발을 수행하는 중에 추가적인 개선 필요성이 확인되어 정립되기도 하였다.

설계 개선 효과

NSSS 유체 계통을 제외한 BOP 유체 계통은 발전소를 구성하고 있는 유체 계통의 대부분을 차지하므로 이에 대한 설계 개선은 플랜트 배치, 구조 설계 및 전기/계측 설계 등 전반적인 설계 분야에 그 효과를 미치게 된다.

따라서 BOP 유체 계통 설계 개선 효과는 KSNP+ 전반에 절대적인 개선 효과를 미치고 있다.

BOP 유체 계통 설계 개선으로 인한 설비 단순화 및 설비 개선으로 유지 보수성을 향상시키고 방사성 폐기물 환경 방출량 및 작업자 피폭 선량을 감소시키는 직접적인 개선 효과가 있었으며, 계통 구성 최적 및 단순화로 내부 사건 노심 손상 빈도(CDF)가 영광 5·6호기의



<표 2> BOP 유체 계통 설계 개선 기법 비교

구분	KSNP(울진 5·6호기)	KSNP+	
		설계 개선 개념	개선 과제
가연성 기체 제어 계통			
계통 구성	수소 재결합기 : 100% x 1대/계열, 부지 공유 설비, 보조 건물내 설치, 수동 작동 습분 분리기 : 2개/호기-원자로 건물 격리 밸브 : 8개/호기	-파동형 수소 재결합기(PAR) : 200% 용량/호기 (6개/호기), 원자로 건물 내부에 배치, 전원 공급 및 운전원의 조작이 필요 없음 -습분 분리기 삭제-원자로 건물 격리 밸브 : 4개/호기	F33
운전원 조치	-정상시 : 18개월마다 이동 후 기능 시험, 예열 장치의 운전 점검 -설계 기준 사고시 : 수동 조작 -중대 사고시 : 수소 점화기(수동 조작)	-정상시 : 정기 점검 기간중 촉매제 점검 -설계 기준 사고시 : PAR (자동 작동) -중대 사고시 : 수소 점화기(수동 조작)	F33
증기발생기 취출 계통			
계통 구성	-연속 취출 탱크 : 1% MSR 취출 용량 (2대/호기) -고유량 취출 탱크 : 14.0% MSR 취출 용량(1대/호기)	-연속 취출 탱크 2대와 고유량 취출 탱크 1대를 6%(연속 취출 1% + 고유량 취출 5%)MSR 취출 탱크 1대로 통합 -고유량 취출 유량 5% MSR로 축소 -통합 탱크 및 재생 열교환기 이용 불가능시 복수기로 우회 배관 신설	F24
계통 구성	-비재생 열교환기 : 습식 휴판시 열제거 기능(100%x1대/호기) -고유량 취출 이송 펌프: 200 gpm 용량 1대/호기	-비재생 열교환기 삭제 -고유량 취출 이송 펌프 삭제	F24
설치 위치	-취출 계통의 모든 기기는 터빈 건물에 위치	-통합 취출 탱크 및 재생 열교환기를 보조 건물내에 설치	L05
1차측 기기 냉각수 계통			
계통 구성	-독립된 2개의 계열 -안전성 관련 기기 : 계열별 분리 배치, 다중성 확보 -비안전성 관련 기기 : 양 계열에 열 부하 및 유량을 기준으로 적정 분배	-공동 연결관으로 연결된 2개 계열 -안전성 관련 기기 : 계열별 분리 배치, 다중성 확보 -비안전성 관련 기기 : 계열 구분없이 양 계열에서 냉각수 공급이 가능 -사고시 계열 자동 분리	F14
계통 구성	-모든 운전 모드에서 각 계열 독립 운전	-정상 운전시 : 양 계열 중 한 계열에서 펌프 1대와 2대의 열교환기가 운전, 주기적으로 계열 전환 운전을 수행 -사고시 : 비안전성 관련 기기에 냉각수 공급 차단, 동시에 각 계열이 분리, 독립적으로 운전	F14
Surge Tank 배치	-Type : Vertical -배치 : 1차 보조 건물 EL. 161'	-Type : Horizontal -배치 : 보조 건물 EL. 124'	-
계통 설계 압력	-150 psig	-200 psig	-

구분	KSNP(울진 5·6호기)	KSNP+	
		설계 개선 개념	개선 과제
액체 방사성 폐기물 계통			
계통 구성	-원심 분리기 및 정화 설비 : 60gpm 용량의 Package 2식 -폐액 탱크 : 8개/양호기 -공급 탱크 2개/공급 펌프 2개	-원심분리기 제거 및 역삼투압 설비와 정화설비를 단일 Package 화 -폐액 탱크 : 6개/ 양호기 : 화학 폐액 배수 탱크(2개) 삭제 -공급 탱크 및 공급 펌프 제거	F41 L04
계통 구성	-제염 계수 : Cs (1,000), : 기타 핵종 (500) -방사성 물질 방출량 : 0.64 Ci/yr -폐기물 발생량 (52드림/년) : 슬러지 (12 드림/년) : 폐수지 (40 드림/년)	-제염계수 : Cs (2,000), : 기타핵종 (1,000) -방사성 물질 방출량 : 0.57 Ci/yr -폐기물 발생량 (39 드림/년) : 슬러지 (20 드림/년) : 폐수지 (18 드림/년) : 폐역삼투막(1 드림/년)	F05 -
설치 위치	-방사성 폐기물 건물 및 2차 보조 건물	-복합 건물	L04
1차 시료 채취 계통			
계통 구성	-정지 냉각 운전시 시료 채취점 : 정지 냉각 Suction Line 및 ESF Pump Mini-Flow Line -사고후 시료 채취점 : 재순환 집수조 및 ESF Pump Mini-Flow Line -CVCS 시료 채취 : GA 특성으로 별도의 시료 채취 펌프 설치(3대/호기)	-정지 냉각 운전시 시료 채취점 : 중복된 시료 채취점 및 관련 설비 삭제 (Shutdown Cooling Suction Line으로 단일화) -사고후 시료 채취점 : 재순환 집수조로 단일화(ESF Pump Mini-Flow Line 시료 채취점 삭제) -CVCS 시료채취 : KSNP+의 GA특성을 반영하여 CVCS 시료 채취 펌프 삭제	F06
복수 저장 및 이송 계통			
계통 구성	-호기당 안전성 관련 탱크 50%×2대로 구성-	-2개호기 기준 비안전성 관련 탱크 50%×3대로 구성	F03
운전 모드	-안전성 관련 계통 및 비안전성 관련 계통에 복수 공급	-복수 저장 및 이송 계통과 보조 급수 저장 및 이송계통으로 분리하여, 복수 저장 및 이송 계통은 비안전성 관련 계통에만 복수를 공급	F03
복수 저장 탱크	-안전성 및 비안전성 용수를 함께 저장, 50%×2대/호기	-비안전성 용수만 저장, 50%×3대/2개 호기(50%×1대/호기, 50%×1대는 2개 호기 Swing)	F03
복수기 진공 계통			
계통 구성	-33-1/3% 용량의 진공 펌프 4대와 100% 용량의 증기 분사 공기 추출기 1대로 구성	-33-1/3% 용량의 진공 펌프 4대로 구성	F26
운전 모드	-기동 운전 : 진공 펌프-정상 운전 : 증기 분사 공기 추출기	-발전소 운전 모드에 상관없이 진공 펌프 사용	F26



구분	KSNP(울진 5·6호기)		KSNP+	
			설계 개선 개념	개선 과제
급수 계통				
급수 펌프 구성	-65% × 2대의 터빈 구동 주급수 펌프 + 65% × 1대의 예비용 전동기 구동 주급수 펌프		-터빈 구동 주급수 펌프 55%×3대	F12
운전 모드	-발전소 정상 운전시 : 터빈 구동 주급수 펌프 2대가 운전되며 각 펌프당 50%의 급수를 증기발생기에 공급 -주급수 펌프 1대 트립시 : 운전중인 1대의 주급수 펌프 속도가 자동 증가되어 65%의 유량을 증기발생기에 공급		-발전소 정상 운전시 : 3대의 터빈 구동 주급수 펌프가 운전되며 각 펌프당 33-1/3%의 급수를 증기발생기에 공급 -주급수 펌프 1대 트립시 : 운전중인 나머지 2대의 주급수 펌프 속도를 자동 증가되어 110% 급수 유량을 증기발생기에 공급(발전소 출력을 감발하지 않음).	F12
기동용 급수 펌프 용량	-정격 급수 유량의 약 8%		-원자로 출력 5%에 해당되는 급수 유량	F30
순환수 계통				
계통 구성	-순환수 펌프: 16.7% × 6대 -순환수 펌프 후단 배관 수량 : 6열 -순환수 공동 모관 : 미설치 -해수 방출 : 표층 배수		-순환수 펌프: 25% × 4대 -순환수 펌프 후단 배관 수량 : 4열 -순환수 공동 모관 : 설치 -해수 방출 : 심층 배수	F09
운전 모드	-복수기 열폐기 조건 : VWO -복수기 배압 유지 위한 펌프 운전 수량 : 4 ~ 6대		-복수기 열폐기 조건 : MGR -복수기 배압 유지 위한 펌프 운전 수량 : 3 ~ 4대	F09
튜브 크기	-크기 : 7/8 in O.D. 22BWG		-크기 : 1.0 in O.D. 22BWG	-
보조 급수 계통				
보조 급수원	-비안전성 응수와 안전성 응수를 함께 저장하는 복수 저장 탱크 : 50% × 2대/호기		-보조 건물 내에 설치되는 안전성 보조 급수 저장 탱크 : 50% × 2대/호기	F09
계통 구성	-보조 급수 펌프 : 100% × 2대/계열 -독립된 계열로 구성 -증기발생기 입구측 공동 모관에 역지 밸브 설치 -보조 급수 펌프 격리 밸브 후단 배관 : PDT 1540-B/PDT 941-B		-보조 급수 펌프 : 50% × 2대/계열 -계열간 교차 연결 배관 설치 -증기발생기 입구측 공동 모관에 역지 밸브 삭제 -보조 급수 펌프 격리 밸브 후단 배관 : PDT 941-B -보조 급수 펌프 용량 축소에 따른 배관 크기 변경	F25 F27
선택도 분석 기준	-100% 보조 급수 펌프 1대 운전 성공 조건 적용		-50% 보조 급수 펌프 1대 운전 성공 조건 적용	F25
보조급수 차단방법	-2차측 배관 파단시 감압된 증기발생기로의 보조 급수 수동 차단		-2차측 배관 파단시 감압된 증기발생기로의 보조 급수 자동 차단	F25

구분	KSNP(울진 5·6호기)	KSNP+	
		설계 개선 개념	개선 과제
주제어실 공기 조화 계통			
계통 구성	-실온도 제어 방식 ● AHU에 장착된 Electro- Hydraulic Multi-Zone Damper 이용 -공기 조화기 토출측 공통 덕트에서의 계열간 역류 방지 설비 : Electro-Hydraulic Isolation Damper 설치	-실온도 제어 방식 ● AHU에 장착된 Electro- Hydraulic Multi-Zone Damper를 삭제하고 각 덕트에 설치되는 Manual Damper로 변경 ● 급기 온도를 일정하게 유지시키기 위해 Cooling Coil 전단에 Three Way Control Valve 추가 ● Electric Duct Heater를 이용하여 미세 온도 조절 -공기 조화기 토출측 공통 덕트에서의 계열간 역류 방지 설비 : Check Damper 설치	F38
원자로 건물 공기 조화 계통			
계통 구성	-CEDM AHU : 1대/호기(Cooling Coil 내장)	-CEDM AHU 삭제 ● IHA의 CEDM Cooling Fan 이용 ● CEDM Cooling AHU가 담당하던 냉방 부하는 RCFC가 추가 담당	N04
	-RCFC Common Duct 설치	-RCFC Common Duct 삭제, 냉방 및 공기순환 기능 저하 방지를 위해 송풍기 추가 ● S/G Enclosure Recirculation Fan 50%×4대 설치 ● Annulus Area Recirculation Fan 50%×4대 설치	F37
발전소 냉수 계통/필수 냉수 계통			
계통 구성	-발전소 냉수 계통 ● 원자로 건물 냉동기 및 냉수 펌프 : 각 50%×3대 ● 터빈 건물 냉동기 및 냉수 펌프 : 각 100%×2대 ● 방사성 폐기물 건물 냉동기 및 냉수 펌프 : 각 100%×2대 ● 양호기 기준 냉동기 및 냉수 펌프 대수 : 각 12대 -필수 냉수 계통 ● 필수 냉동기 및 냉수 펌프 : 각 100%×2대/계열 (계열간 Cross-Tie Line 미설치)	-발전소 냉수 계통 ● 중앙 냉동기/복합 건물 냉동기 : 각 50%×3대 ● 중앙 냉수 펌프/복합 건물 냉동기 : 각 100%×2대 ● 복합 건물 냉수 펌프 : 100%×2대 ● 양호기 기준 냉동기 대수 : 9대 ● 양호기 기준 냉수 펌프 대수 : 6대 -필수 냉수 계통 ● 필수 냉동기 및 냉수 펌프 : 각 100%×2대/계열(계열간 Cross-Tie Line 설치)	F36
운전 모드	-발전소 운전 모드 또는 계열에 관계없이 냉동기(냉수 펌프)는 계열 당 1대씩 운전	-동절기 발전소 정상 운전시 : 저부하 운전 문제점을 방지하기 위해 냉동기(냉수 펌프)는 양계열 기준 1대만 운전	F36

89% 수준(2단계 설계 개선 사업 결과)으로 감소되어 KSNP+의 안전

성 향상에 결정적인 기여를 하였다. 설계 개선 효과는 복합적으로 나

타하므로 BOP 유체 계통 설계 개선으로 인한 효과를 단순하게 제시



하기 어려우나 BOP 유체 계통 설계 개선을 중심으로 한 설계 개선 효과는 다음과 같이 평가될 수 있다.

1. 신고리 1·2호기 참조 설계 개념 확립

KSNP+ BOP 유체 계통에 대한 기본 설계 개념은 기존 KSNP의 기본 설계 개념 및 안전성을 유지하는 범위 내에서 경제성·시공 편의성 및 운전 보수성이 향상되도록 개발되었다.

신고리 1·2호기는 기존 호기와 동일한 개념으로 선행 호기인 울진 5·6호기를 참조 발전소로 하지만 전반적으로 설계가 변경된 KSNP+의 최초 발전소이므로 실질적인 참조 설계 개념은 KSNP+이다.

BOP 유체 계통 설계 개선 개념은 기본 설계 결과물을 작성한 설계 과정인 기본 설계 개발을 거쳐 기술성·시공성 및 인허가 시현성 관점에서 적용 타당성이 검증되어 KSNP+ 설계 개념의 기본 구조를 성공적으로 구성함으로써 신고리 1·2호기의 계획 공정내 KSNP+ 적용이 가능한 참조 설계 개념을 확립하였다.

2. BOP 유체 계통 설계 기술의 고도화 기본 능력 확보

전반적인 BOP 유체 계통을 대상으로 국내 원전의 건설 경험 기술을

바탕으로 국내 부지 여건 및 가동중 원전의 운전 경험을 통한 설계 특성을 심층 분석하고 설계 개선 사항을 도출하여 기본 설계 개발을 완료함으로써 전반적인 개선 설계 기술을 확보할 수 있었다. 설계 특성을 심층분석하는 과정에서 참조, 복제 개념을 벗어나 근본적 설계 기준 및 인허가 요건을 검토하고 설계 개념에 대한 실제 운영 경험 검토 등 신규 설계 개념을 정립한 영광 3·4호기의 초기 설계 개발과 유사한 과정을 체계적으로 수행하여 고유 모델 수준인 BOP 유체 계통 설계 개념을 완성함으로써 설계 기술 고도화 목표를 달성하기 위한 기본적인 능력을 확보하게 되었다.

3. KSNP+ 경제성 향상에 절대적 기여

KSNP+의 기대 효과로서 경제성 측면에서의 건설 직접비(기자재 구매 비용 및 시공비) 예상 절감 효과는 약 2,107억원으로 평가되었다.

이 중에서 BOP 유체 계통 설계 개선으로 인한 직접적인 절감 효과는 약 895억원으로 평가되었다.

또한 원전 수명 기간중 운전 유지비를 고려하면 약 1,000억원 이상의 추가적인 절감 효과가 예상될 것으로 평가되었다.

따라서 BOP 유체 계통 설계 개선은 KSNP+의 국제 경쟁력 확보를 위한 경제성 향상에 절대적인 기

여를 할 것으로 평가되었다.

4. 국내외 가동중 원전에 대한 유체 계통 설계 개선 수행 능력 확보

상당 부분의 설계 개선 사항은 가동중 원전의 운전 경험을 고려한 심층 검토를 통해 발굴되고 채택되었으며, 이 과정에서 운영 경험에 대한 적용 타당성을 체계적으로 검토하여 설계에 반영하는 경험을 충분히 축적하는 계기가 되었다.

즉 국내외 가동중 원전에 대한 유사한 유체 계통 설계 개선에 대해서도 자체 수행 기술 능력과 사업 수행 경험을 충분히 확보한 것으로 판단되었다.

이러한 경험을 효과적으로 활용하여 향후 국내외 가동중 원전에 대한 유체 계통 설계 개선을 수행한다면 원전의 이용률 및 안전성 증진에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

수상 소감

본 설계 개선 사업은 원전의 경쟁력 제고라는 공감대가 형성된 시대적 요청에 따라 원전 건설 관련사의 유기적인 협조하에 성공적으로 수행되었다.

특히 설계 개선 파급 효과가 전체 발전소에 미치는 영향이 지대한 BOP 유체 계통 설계는 KSNP의

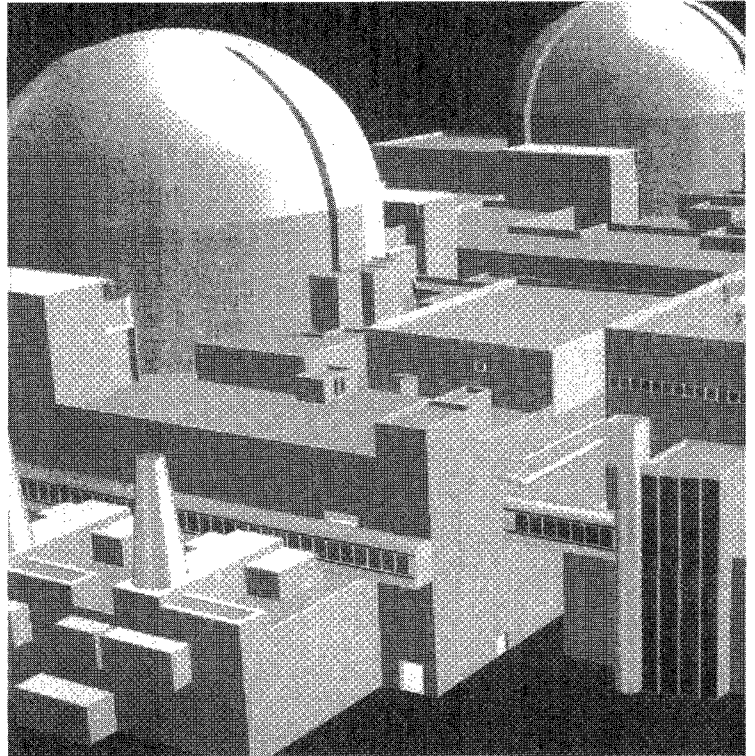
건설 및 운영 경험 뿐만 아니라 최근 입증되고 있는 신기술까지 반영하여 전반적인 설계 개선을 시도하였으며 한국 고유 모델인 KSNP+의 성공적 개발에 절대적으로 기여하였다.

설계 개선 사항으로 채택되기 전까지 한수원의 운영 경험을 충분히 반영하기 위하여 현장 설명회/협의를 수시로 개최하였고, 또한 한수원 전문가의 기술 검토를 거치는 등 한전의 설계 개선 사항 채택 및 기본 설계 개발에는 설계 담당자는 물론 한수원의 참여자들의 많은 노력의 결과가 반영되었다.

국내 최초로, 설계 개선으로 인하여 발전소 안전에 미치는 영향을 확률론적 안전성 평가(PSA)로 분석하여 그 결과에 따라 설계 개선 개념의 채택 및 수정 여부를 결정하여 설계에 재 반영하는 새로운 기법을 적용하였으며, 이로 인하여 KSNP 대비 안전성이 향상되는 KSNP+ 기본 설계 개발이 가능하게 되었다.

지구의 온난화 및 환경 오염 문제를 해결하고 안정적이며 경제성을 갖춘 에너지원인 원자력 발전을 향후 지속적으로 건설, 운영하기 위해서는 원전에 대한 대중 수용성 증진이 필수적이다.

즉 지역 주민과 상생하는 환경 친화적이며 원전 건설 필요성 공감대 제고를 위한 경쟁력을 갖추도록 설



KSNP+ 설계 개선 사업은 원전의 경쟁력 제고라는 공감대가 형성된 시대적 요청에 따라 원전 건설 관련사의 유기적인 협조하에 성공적으로 수행되었다. 특히 설계 개선 파급 효과가 전체 발전소에 미치는 영향이 지대한 BOP 유체 계통 설계는 KSNP의 건설 및 운영 경험 뿐만 아니라 최근 입증되고 있는 신기술까지 반영하여 전반적인 설계 개선을 시도하였으며 한국 고유 모델인 KSNP+의 성공적 개발에 절대적으로 기여하였다.

계 개선이 지속적으로 필요하며 이러한 설계 개선은 신뢰성에 바탕을 둔 안전성 향상을 전제로 시행되어야 한다.

앞에서 언급한 KSNP+ 설계 개념을 정립한 설계 개선 사업의 체계적이며 획기적이었던 경험은 향후 원전의 지속적인 설계 개선을 수행하는 데 있어 신뢰와 기대를 갖게 해줄 것으로 확신한다.

원자력기술상을 수상하여 본 글을 올릴 수 있도록 해주신 많은 분들께, 특히 어려운 여건에서 주어진 사업 목표를 완수하기 위해 늦은 밤 함께 시간을 보낸 계통 설계 참여자들과 설계 개선 1·2단계 사업이 성공적으로 완수되도록 사명감을 갖고 BOP 유체 계통 설계 개선에 동참한 한수원 관계자 분들께 진심으로 감사사를 드린다. ☺