

차세대원전의 복합건물 기기배치(GA) 설계최적화

Design Optimization of Compound Building of General Arrangement in Korean Next Generation Reactor

정대욱, 김성환, 정대율

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

차세대원전 발전소 기기배치설계를 최적화하기 위하여 수차례에 걸쳐 국내원전 현장의견을 수렴하였으며, 국내원전중 운전성 및 보수성이 우수한 것으로 평가받고 있는 울진 1,2호기를 벤치마킹하였다. 복합건물 배치목적은 운영성 향상 및 경제성 제고이며, 호기간 중앙에 출입통제건물, 방사성폐기물처리건물 및 방사성기기공작실을 통합하여 배치하였다. 운영성 향상방안으로는 복합건물에서 양호기 보조건물에 접근성 확보, 출입통제기능 일원화, 1 & 2차측 시료채취 및 실험실 복합건물내 배치, 운영지원실(OSC) 설치 및 방사성폐기물 처리에 대한 신기술을 수용가능하도록 별도의 Future Extension Area 를 확보하였다. 경제성 향상 효과로는 출입통제건물 및 설비 공유로 건물체적 및 설비 물량감소, Hot Pipe 및 Personnel Tunnel 삭제, 배관 및 케이블의 물량감소 등을 들 수 있다

Abstract

In order to optimize the general arrangement(GA) of Korean Next Generation Reactor (KNGR), field opinions in domestic nuclear power plants have been collected, and the bench marking on UCN #1,2 which was estimated to be the excellent in view of operability and maintainability has been accomplished. The compound building is introduced for the purpose of improving of operability and economics, and compound building which is located between both auxiliary building is including the function of access control, radwaste treatment and hot machine shop. Major items to be selected for operability are summarized as follows; "accessibility from compound building to both auxiliary building", "one point access control", "including the 1st and 2nd sampling facility and laboratory", "operation support center for emergency response", and "future extension area for new technology of radwaste treatment". Major effects in view of economics are summarized as follows; "common of access control building and facility", "deleting hot pipe and personnel tunnels", "reducing of the length of piping and cable", and so forth.

1. 서 론

차세대원전은 '92. 6월 정부의 G-7과제로 개발토록 확정되었으며, 안전성과 경제성을 향상시켜 대내외적 경쟁력을 확보하고 장기전력수급 계획에 따른 전력수요 충족을 위해 대용량(1,400MWe

급) 개량형 원전에 대한 표준설계를 한전 주도로 산·학·연이 합동으로 개발해왔다. 차세대원자로 기술개발은 Ⅲ단계로 구분하여 추진되고 있으며 I단계('92. 12~'94. 12)와 II단계('95. 3~'99. 2)에서 각각 “노형선정/개념설계 개발”과, “기본설계 개발/표준안전성분석보고서 작성/원자로계통 주요기기 사양작성 등”을 완료하였고 또한 Ⅲ단계('99. 2~'01. 12)에서 “설계최적화와 설계인증”, “장기소요항목 설계개발”을 목표로 설계를 추진중에 있다. 따라서 본 보고서에서는 차세대원전의 I, II단계에서 개발된 발전소 일반기기배치도 대비 운영성과 경제성 향상을 목표로 Ⅲ단계에서 추진중인 양호기 공용의 복합건물 기기배치 및 계통설계 최적화에 대해서 소개하고자 한다.

2. 차세대원전 건물배치 설계개념

차세대원전은 특정부지가 아닌 포괄부지 특성을 고려 개발됨에 따라 특정부지에 적용시 부지여건(Site Specific)만을 반영한 표준설계가 최대한 활용 될수 있도록 고려 되었으며, 차세대원전 건물 및 구조물 구성은 크게 Nuclear Island, Turbine Island 및 Site Specific으로 구분하고 Nuclear Island에는 격납건물, 보조건물 및 복합건물(출입통제 및 방사성폐기물처리지역 포함)를 포함하고 있다. 2개 호기 기준으로 개발하였으며 터빈건물의 배치는 원자로 격납건물에 대한 터빈건물의 배치형태에 따라 방사상배치(Radial Arrangement)와 접선형배치(Tangential Arrangement)로 분류할수 있으나, 차세대원전은 시공성향상 및 터빈비산물의 영향 등을 고려 방사상 배치를 채택하였다. 접선형 배치는 터빈건물 운전층 공유, 부지면적 감소 등의 잇점이 있으나 터빈비산물의 영향에 대한 고려가 필요하다. 발전소 양호기 배치형태는 2개 호기를 배치할 때, 배치형태에 따라 평행이동형 배치(Slide Along)와 선대칭형 배치(Mirror Image)로 구분할수 있으며, 평행이동형 배치는 울진 3,4호기와 같이 가능한 공유설비를 줄이고 각 호기마다 동일한 형태로 설계하는 배치 형태이며, 선대칭형 배치는 울진 1,2호기와 같이 가능한 설비를 공유하기 위해서 2개 호기의 중앙 부근에 공유설비를 설치하고 각 호기를 서로 마주보는 형태로 배치한다. 선대칭형 배치로 설계시 설비공용화로 부지활용도 증대 및 초기투자비 감소 등의 효과가 있으나, 차세대원전은 계통 독립성 확보, 인/허가성 충족 등을 종합적으로 고려하여 평행이동형 배치를 채택하였다. 복합건물배치로 II단계와 III단계 설계의 건물배치 차이점은 그림1, 2와 같다.

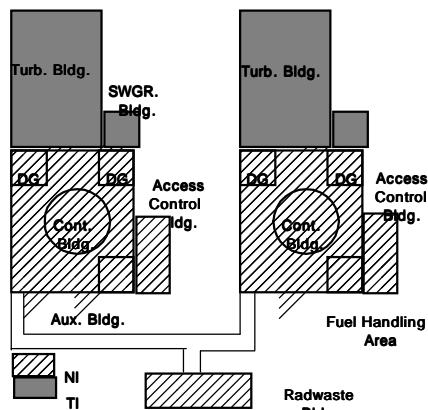


그림 1. 차세대원전 발전소건물 및 기기배치도(II단계 설계 기준)

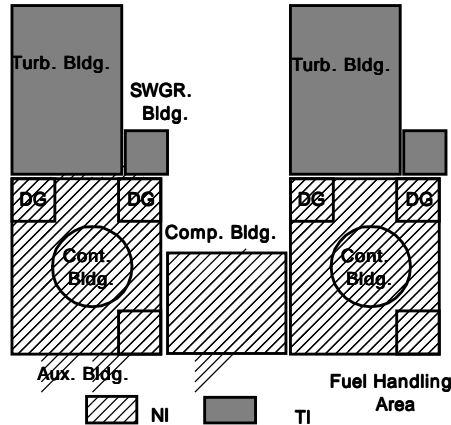


그림 2. 차세대원전 발전소건물 및 기기배치도(III단계 설계 기준)

3. 복합건물 배치설계

가. 배치원칙

발전소의 운영성 향상은 그 효과를 정량적으로 측정하기는 곤란하지만 발전소 전 수명기간 동안 지속적으로 영향을 미치기 때문에 실질적인 개선효과가 클것으로 판단된다. 운영성 향상은 궁극적으로 인력운영의 최적화를 기할 수 있게 함으로서 인건비를 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 이용률의 향상을 기할수 있고, 복합건물 배치(2개호기의 건물 공유)시 경제적인 측면에서도 효과가 큰 것으로 분석되었다. 이와 같은 운영성 향상 및 경제성 제고의 일환으로 호기간 중앙에 출입 통제건물 등 일부건물을 통합 배치하는 복합건물 설계의 기본방향은 복합건물과 양호기 건물과의 최적의 기능적 요건 고려, 운전, 보수요원의 주출입지역(주제어실, 보건물리실, 터빈운전층 등) 상호간 연계성 확보, 출입통제지역의 공용화 및 Radwaste Tunnel 삭제, 안전성 및 이용률 저하요인 방지 및 인허가성 확보, 안전설비 및 전력생산에 직접 관련되는 설비의 공유화 배제 등이다.

나. 배치방안

복합건물의 구성은 안전관련설비 또는 전력생산 직접 관련설비를 수용하고 있는 격납, 보조, 터빈, 비상디젤발전기 및 스위치기어 건물은 인허가 취득 및 이용률 제고 측면에서 통합화에서 제외하였다. 복합건물 대상건물은 관점별 영향을 검토후 출입통제, 방사성폐기물처리 및 방사성기기 공작실을 대상으로 하였다. 차세대원전의 복합건물 설계시 호기간 적정 간격 설정을 위하여 국내외 원전의 사례를 조사 분석하였으며, 차세대원전의 설계조건에 적합한 호기간의 간격을 산출하였다. 차세대원전에서 중방향 평행이동형 배치형태를 채택할 때 단순히 구조물과 취수로간의 간섭이 없는 양호기의 최소 근접거리(원자로 중심간)는 373ft 이나, Transformer를 터빈 축방향으로 배치시 Transformer와 Switchgear 건물간의 거리증대로 Cable 공사량 증가, 터빈축방향 길이 증가로 발전소 부지 활용성 저하 및 소요면적 증가, 호기간 공간내 협소로 공용건물 설치 곤란등의 문제가 예상된다. 따라서 차세대원전에는 양호기 사이에 Transformer 및 도로설치, 복합건물의 목적 및 기능을 유지하며 발전소 안전성을 저해하지 않고 건설성 영향을 최소화할 수 있는 호기간의 적정 간격(원자로 중심간)은 500ft-4inch(152.5 m)로 설정하였다.

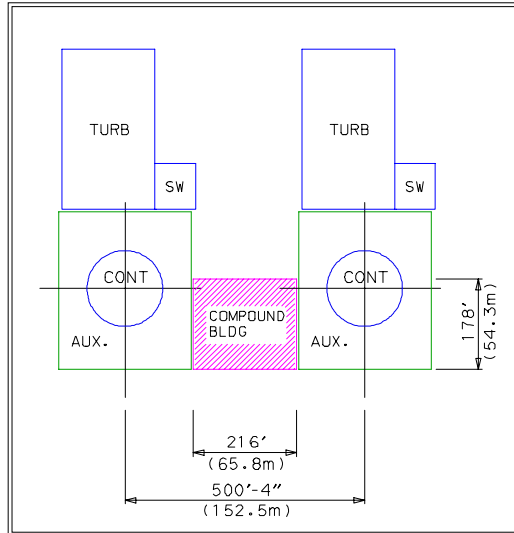


그림 3. 복합건물 위치 및 호기간 거리

4. 복합건물 계통설계 최적화

가. 기체방사성 폐기물계통

기체방사성폐기물계통은 예상운전 과도사고를 포함한 발전소 정상운전 기간 동안에 발생하는 방사성기체를 수집, 처리하여 작업자, 일반 대중 및 환경을 보호하고 방사능 방출량이 10 CFR 20, 부록 B에 명시된 방출농도 제한치와 10 CFR 50, 부록 I 에 명시된 ALARA 지침을 만족하도록 설계된다. 동 계통은 양 호기 공용으로 각 호기별 폐기체 모관, 모관 배수탱크 1 대, 폐기체건조기 1 대, 활성탄보호대 1 대, 연속되는 4 대의 활성탄지연대, 관련 밸브를 포함한 배관 및 계측설비로 구성된다. 기체방사성폐기물계통은 계통의 성능 및 보수편의성 제고, 고체폐기물 발생량 저감을 위해 중복 기능을 갖는 설비 제거 및 계통구성 단순화를 통해 모관 배수탱크는 Surge 기능없이 단순한 배수수집 기능 유지, 동 계통의 Package 설비 단순화를 위해 전/후단 여과기 제거 및 단일 제습 트레인을 유지하고, 발전소 냉방수계통 고장을 대비하여 전용 냉각기 설치 등을 채택하였다. 계통성능 기준 및 기기 용량은 상온 활성탄지연법으로 폐기체를 처리하며, Xe에 대해 45일의 지연시간을 적용하여 활성탄지연대 용량을 결정하였다. 기체방사성폐기물 처리설비의 기기배치는 폐기체모관 및 설비 사이 연결 배관내에 생성된 응축수는 중력에 의해 복합건물 최저층에 설치된 모관배수탱크로 수집되도록 배치하고 동 계통의 설비중 방사성/비방사성을 취급하는 설비들은 분리배치하고, 운전 및 보수 편의성을 고려하여 충분한 공간을 확보하였다.

나. 액체방사성 폐기물계통

액체방사성폐기물계통은 발전소 예상운전 과도사고를 포함한 정상운전 기간동안 발생하는 액체 방사성폐기물을 방사성폐액 특성에 따라 기기배수, 바닥배수, 화학폐액 및 세탁폐액으로 분리수집하여 처리설비를 이용, 규제기준에 적합하게 처리하여 소외로 방출하는 계통으로 발전소 종사자, 일반대중 및 환경을 보호하고 방사능 방출량이 10 CFR 20, 부록 B에 명시된 방출농도 제한치와 10 CFR 50, 부록 I 에 명시된 ALARA 지침을 만족하도록 설계된다. 동 계통은 방사성폐액 특성에 따라 기기폐액, 바닥배수 및 화학폐액으로 구분하여 처리하는 설비와 그 부대설비로 구성된다. 액체방사성폐기물계통은 방사성물질 방출량 감소, 고체폐기물 발생량 최소화, 작업자 방사선피폭 저감, 계통의 운전성 및 신뢰도 제고를 위해 다음과 같이 설계를 최적화하였다. 폐액

증발기 대신에 역삼투막처리설비 및 이온교환기를 주처리 설비로 적용, 폐액 특성에 따라 처리방식을 세분화하여 계통 전체의 탱크, 펌프 및 제염설비의 다중성 강화, 폐액을 효율적이고 경제적으로 처리하기 위해 이동식처리설비를 적용가능 하도록 배치하였다. 계통성능 기준 및 기기 용량은 발전소 한 호기는 정상 운전되고 다른 호기는 비정상 운전되는 것을 기준으로 1 일 최대 발생 할 수 있는 폐액을 수집, 처리할 수 있도록 기기 용량을 결정하였다. 복합건물내 액체방사성폐기물 처리설비들의 기기배치는 계통의 성능유지, 운전성 및 보수 편의성을 고려하여 배치하였다.

다. 고체방사성 폐기물계통

고체방사성폐기물계통은 발전소 운전중 발생하는 고체방사성폐기물을 수집, 분리하여 처분 및 수송에 적합하도록 처리하는 기능을 수행한다. 처리된 폐기물을 발전소 부지내 임시 저장고 또는 영구처분장으로 이송하기에 앞서 일정기간 저장한다. 고체방사성폐기물처리계통은 발생된 처리대상 폐기물에 따라 계통구성이 달라지므로 액체방사성폐기물처리계통의 폐기물 처리개념에 따라 큰 영향을 받는다. 고체방사성폐기물처리계통에서 처리할 주요폐기물은 폐수지, 폐필터 및 건조폐기물 등이며, 이 폐기물을 처리하는 설비로 구성된다. 각 하부계통의 처리설비 구성은 다음과 같다. 폐수지 처리는 방사성 준위에 따라 고방사성 폐수지와 저방사성 폐수지로 분리하여 처리한다. 고방사성 폐수지 처리설비는 폐수지 취급과 관련된 밸브를 포함한 배관, 계측설비 및 2대의 폐수지 장기 저장탱크로 구성되고, 저방사성 폐수지 처리설비는 1대의 저방사성 폐수지탱크, 1대의 저방사성 폐수지 이송펌프, 1대의 폐수지 건조 처리설비, 관련 밸브를 포함한 배관 및 계측설비로 구성된다. 건조 폐기물 처리설비는 복합건물내에 1대의 고체폐기물 압축기, 1대의 비닐폐기물 압축기 및 분류처리설비로 구성되며, 분류처리설비는 Sorting Desk, Sorting Table, 분쇄기 및 Bag Monitor로 구성된다. 폐필터 처리설비는 1대의 폐필터 취급캐스크, 1대의 작업용 차폐 플러그, 폐필터 취급장비, 캐스크/드럼 운반기 등으로 구성되며, 기타 설비에 3 대의 새수지 주입기와 폐기물 드럼 임시저장구역이 마련된다. 고체방사성폐기물계통은 최종 처분되는 고체폐기물 발생량 최소화, 작업자 방사선피폭 저감, 계통의 운전성 및 신뢰도 제고를 위해 다음과 같이 설계를 최적화 하였다. 카트리지 필터, 슬러지 및 폐수지 등은 고화처리 하지 않고 탈수한 뒤 전용 드럼이나 고건전성용기에 포장하고, 건조폐기물은 우수한 감용설비로 처리하고, 복합건물이 보조건물 근처로 위치됨에 따라 이송배관 단축 및 배관 Slope이 가능하므로 보조건물 탈염기에서 배출되는 폐수지를 임시저장 및 이송하는데 사용된 고준위 폐수지 저장탱크 및 이송펌프를 제거하고, CVCS 원자로 보충수 펌프를 이용하여 복합건물내 해당 탱크로 폐수지를 직접 이송하도록 설계하였다. 긴 Radwaste Tunnel이 없어지고 복합건물이 보조건물 근처로 위치되므로 카트리지 필터 이송로가 단축되고 계획예방 정비시 발생하는 다량의 건조폐기물을 처리하기 위해 보조건물 운전층에 설치된 Solid Waste Compactor는 복합건물이 보조건물에 근접 설치되므로 원래 방사성폐기물 처리지역내 설치된 Solid Waste Compactor로 대체가능하여 제거하였다. Waste Drum Storage Area 의 저장용량은 6개월 이상 폐기물을 저장할 수 있도록 설계하였으며, 또한, 고체폐기물을 효율적이고 경제적으로 처리할 수 있는 이동식처리설비의 설치 공간을 확보하였다. 복합건물내 고체방사성폐기물 처리설비들의설치위는 계통의 성능유지, 운전성 및 보수 편의성을 고려하여 배치하였다.

5. 복합건물 배치설계 특성

가. 운전성/정비성 향상(접근성 포함)

발전소 수명기간동안 각종 설비 및 계통들이 미리 정해진 조건에서 정확한 기능이 수행될 수 있도록 운전 및 지속적인 유지 관리가 필수적이다. 이러한 운전 및 지속적인 유지관리를 위해 초기 개념설계시 운전·보수성 향상을 위한 충분한 고려가 이루어져야 한다. 특히 원자력발전소는 일

반산업 Plant와 달리 방사성 물질이 계통중에 함유되어 운전되기 때문에 운전 보수요원들의 피폭 및 주변 환경영향에 대하여 엄격한 규제요건이 적용된다. 따라서 차세대 원전에서는 국내외 발전소 설계경험 및 선행호기 운전경험에 따른 개선요구사항들을 최대한 반영하였다. 그러나 호기별 설비를 단일의 복합건물에 수용하므로써 야기될 수 있는 운전원의 오동작은 차세대원전의 경우 영향이 크지 않을것으로 판단된다. 차세대원전의 복합건물 설계는 근본적으로 공유대상 설비를 전제로 하였기 때문에 운전원이 해당호기를 혼동하지 않는 한 오동작의 우려는 배제할 수 있으며, 해당호기 접근시 혼동 방지책은 시청각 및 전자 물리적 장치 등 다양한 방안의 강구가 가능하다.

1) 출입통제기능 및 접근성

양호기 공용의 출입통제 시설을 사용하므로써 운영성 향상과 각 호기의 접근이 용이하게 되었다. 또한 방사성폐기물건물이 복합건물로 통합되어 별도의 출입통제 관리 및 제염시설 등의 이원화 문제를 해소하였다. 복합건물 1층에서 보건물리실, 양호기 보조건물 지상1층 청정구역 및 관리구역, 복합건물 3층 옥상통로에서 양호기 주제어실의 동선을 확보하였다.

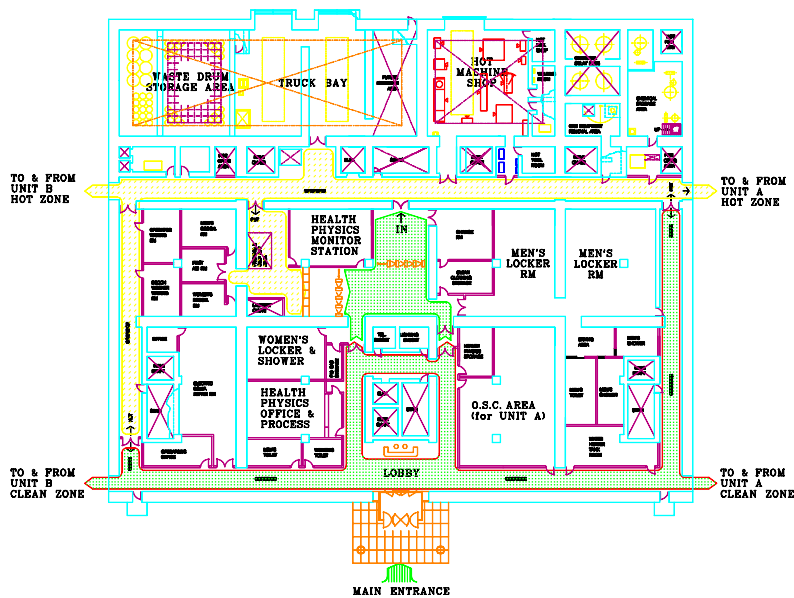


그림 4. 복합건물 동선(지상 1층)

2) 1 & 2차측 시료채취 및 실험실의 통합운영

복합건물에 시료채취 및 실험실 배치는 발전소 운영 측면에서 화학요원들의 접근, 관리에 어려움이 많아 지속적으로 개선이 요청되어온 사항으로 인력운영의 최적화와 효과적인 설비관리 측면에서 유리하다. 발전소 수명기간 동안의 운영성 관점에서, 시료채취설비는 호기별로 배치하고 실험실은 통합하여 복합건물에 배치하였다.

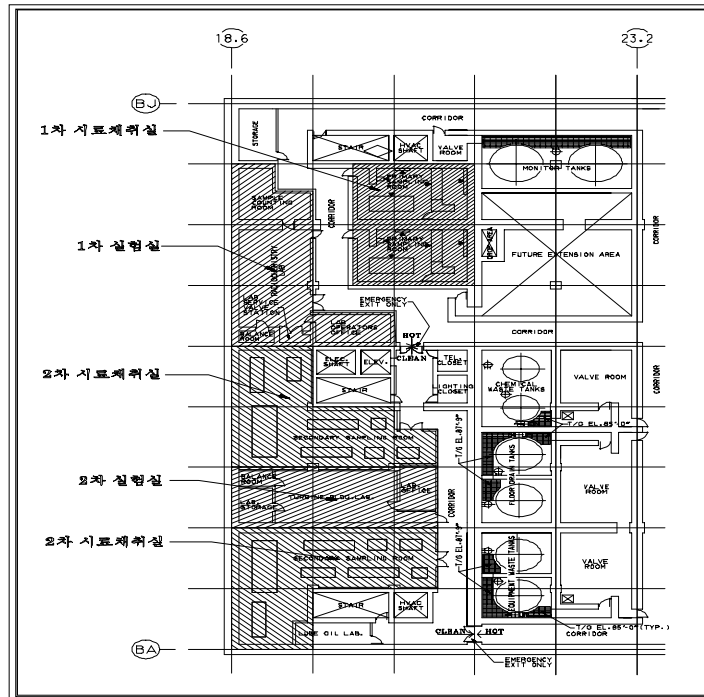


그림 5. 1 & 2차측 시료채취 및 실험실 복합건물내 배치(지하 1층)

3) 비상운영요원의 관리구역 접근 용이

운영지원실은 기 지명된 발전소 운영지원요원들의 집합장소로 주제어실 및 기술지원실과 별도의 장소인 발전소내에 설치되어야 하며, 비상시 주제어실과 기술지원실의 요원들과의 비상협조체제를 구축하고 관련업무를 지원하는 기능을 수행한다. 비상시 양호기 주제어실 및 보조건물 관리구역에의 신속한 접근을 위해서 1개 호기용은 복합건물 3층에 배치하고, 나머지는 관리구역 접근이 용이하도록 복합건물 1층에 배치하였다.

4) 오염기기의 관리구역내 최단거리 이송

복합건물에 공용의 방사성공작기기실을 설치하므로써 오염기기를 관리구역내에서 최단거리로 이송할 수 있다. 또한 소외반출요건 등의 까다로운 절차를 생략할 수 있으며 소외 이동으로 인한 외부 오염 가능성을 근원적으로 배제할 수 있다.

5) Future Extension Area 공간 확보

2개의 Truck Bay가 제공되어 하나는 통상적인 폐기물 드림의 적재 및 하역에 사용되며 다른 하나는 이동식설비(Mobile System) 사용을 위해 계획되었다. 특히, 방사성폐기물 처리에 대한 신기술/신개념이 급속도로 발전하고 있는 것을 감안하여 이동식 설비용 Truck Bay에 확장 가능지역(Future Extension Area)을 제공함으로써 시설의 대폭적인 변경 없이 신기술을 수용할 수 있는 방안을 확보하였다. 또한 주 발전설비(Power Block)로부터 발생하는 방사성폐필터를 저장구역으로 이송시, Tunnel을 이용하지 않고 보조건물 지상층(EL. 100')으로부터 복합건물 지상층(EL. 100')으로 직접 이동이 가능케 됨으로 이송거리의 단축과 취급을 용이하게 하였다.

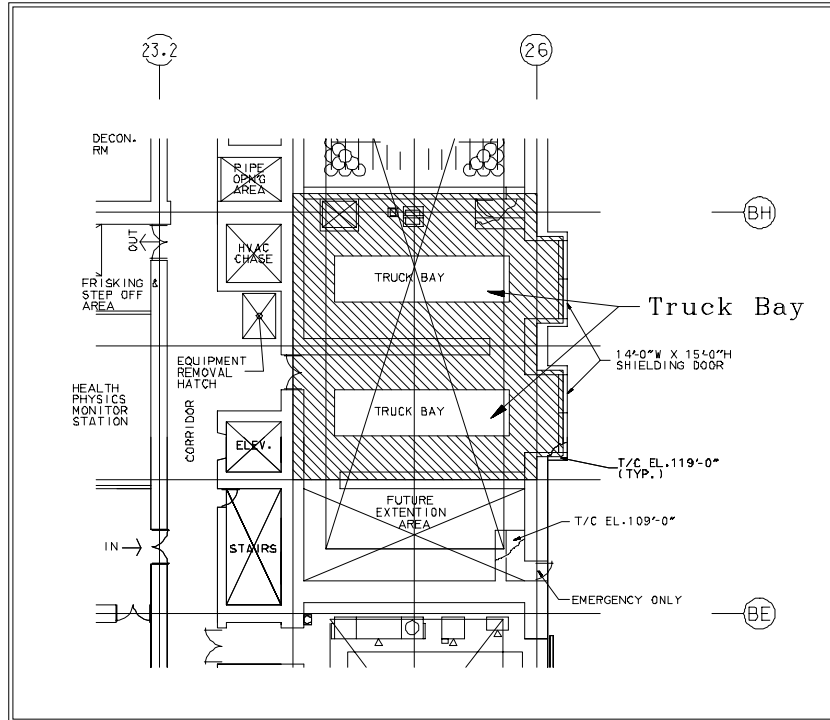


그림 6. Truck Bay 와 Future Extension area(지상1층)

나. 경제성 효과

출입통제건물, 방사성 공작기기실 및 방사성 폐기물건물을 통합하여 복합건물로 설계시와 II 단계에서 수행된 차세대원전 표준 GA 건물 배치(양호기 분리형)와 대비하여 건물 체적 약 10% 감소에 따른 토목물량 감소, 배관 및 케이블 길이 감소등으로 직접건설비 약 75 억원이 절감되는 경제적 효과를 갖는다. 추가로 복합건물 배치시 호기간 간격축소로 부지점유면적 감소가 예상되나, 본절에서는 부지절감효과는 분석에서 제외하였다.

표 1. 복합건물 배치전후 물량비교('99. 9 기준)

항목	단위	물량비교			증감율(%)
		분리형	복합건물 배치	증감	
건물체적	ft ³	3.61 × 10 ⁶	3.26 × 10 ⁶	-0.35 × 10 ⁶	-9.7
건물연면적	ft ²	180,824	182,304	+1,480	+0.8
콘크리트	CY	43,408	40,862	-2,546	-5.7
철근	TN	6,441	4,987	-1,454	-22.6

표 2. 복합건물 배치전후 건설비 비교('99. 9 기준)

항목		증감액(백만원/2기)	비고
직접 건설비	기기공유	-1,430	
	배관, 케이블	-3,318	
	Civil & Architectural Work	-379	
	Concrete Work	-2,280	
	Steel Work	-98	
	합계	-7,505	

6. 결 론

발전소 건물 및 기기배치를 수행함에 있어 안전성 확보에 바탕을 두고 운전, 보수편의성과 함께 경제성 있는 발전소 배치를 위하여 본사 및 사업소 설명회, 현장방문 등을 통해서 선행호기 운전경험 및 설계개선 사항 등을 최대한 반영하였다. 복합건물은 양호기의 공용설비를 통합배치함으로써 본관건물이 점유하는 면적이 상대적으로 적어 부지 이용의 신축성 및 효율화를 통한 부지 이용율의 향상을 도모 할 수 있으며 발전소의 건물체적, 건설물량 및 설비 등이 감소하므로 초기투자비 절감에 기여한다. Hot Pipe 및 Personnel Tunnel 삭제로 관련 계통, 배관 등의 최단 거리 설계가 가능하며, 양호기를 공용의 단일 출입통제구역에서 각 호기의 관리구역 출입통제가 가능하므로 적절한 출입통제 설비 및 인원을 유지하여 운영에 원활을 기할 수 있다. 또한, 시설의 공유화 및 집중화로 설비 구매비용과 운영비용의 감소가 가능하여 경제성 향상을 기대할 수 있다. 방사성공작기기설을 복합건물내 공용으로 배치함에 따라 오염기기 및 부품들에 대한 이송절차 간소화 및 이송시간 단축이 가능하고 보수요원의 방사선 피폭 저감에 기여할 수 있다. 복합건물 설계는 정성적인 분석과 개략적인 물량 산정방법이 수행되었으나 보수적으로 접근하였기 때문에 상세단계에서 보다 정량적인 분석을 통해 신뢰성이 향상된 결과를 기대할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 한국전력, 기술개발: 차세대원전 기술개발 현황, '97년 겨울호, 제 33집, 1997. 12
2. 한국전력, "General Arrangement Nuclear Island(KNGR-III), Rev.1, 2000. 7
3. 한국전력, 원자력발전소 표준화설계를 위한 조사용역, 운전보수성 저해요인 해소방안 검토, Vol. 19, 1987. 8
3. 한국전력, 원자력발전소 표준화설계를 위한 조사용역, 건물배치 및 크기최적화 검토, Vol. 23, 24, 1987. 8
4. 한국전력, 한국표준원전 설계개선사업 종합보고서(본문편 제1권), 1999. 1