

신설 PWR 플랜트 설계 및 건설의 최신 기술

山浦 良久

미쓰비시중공업(주) 경수로플랜트 기술부 차장

서 론

미쓰비시중공업은 지금까지 1970년에 가동을 시작한 미하마 1호기를 포함하여 23기의 가압경수로(PWR)를 건설해 왔다. 1997년에 운영을 시작한 겐카이 4호기 이후, 일본에서의 PWR 건설이 일시 중단되었다.

그러나 북해도전력의 도마리 3호기(3-loop, 912MWe)의 안전성 평가가 2000년 11월에 시작되었으며, 최초의 개량형 가압경수로(APWR)인 일본원자력발전(주)의 쓰루가 3·4호기(4-loop, 1,538MWe)에 대한 안전성 평가가 곧 시작될 예정이다.

일본에서의 PWR 원전은 이제 전 범위로 설계되고 있으며, 신규 PWR의 건설이 본격적으로 시작될 예정이다.

신규 설계의 간단한 소개에 이어 개선된 설계 방법의 기술, 3D-

CAD 설계 시스템의 개선 및 향상된 사업 관리 절차, 신규 원전을 위한 새로운 건설 방법에 대한 개념을 소개하겠다.

23년간의 건설 경험을 토대로 MHI는 신규 원전의 신뢰성과 안전성 제고를 도모하고 그들의 순조로운 설계 및 건설을 추진할 예정이다.

신규 PWR 원전의 주요 설계 특성

신규 원전의 신뢰성·경제성 및 운전 성능을 개선하기 위한 새로운 기술들이 채택되었다. 다음의 새로운 설계 기술들이 도마리 3호기 및 쓰루가 3호기에 공통적으로 적용되었다.

1. 통합 디지털 계속 제어 계통 및 개량 주 제어반

미쓰비시는 5개 발전소에서 제어 계통에 디지털 기술을 사용했다. 그

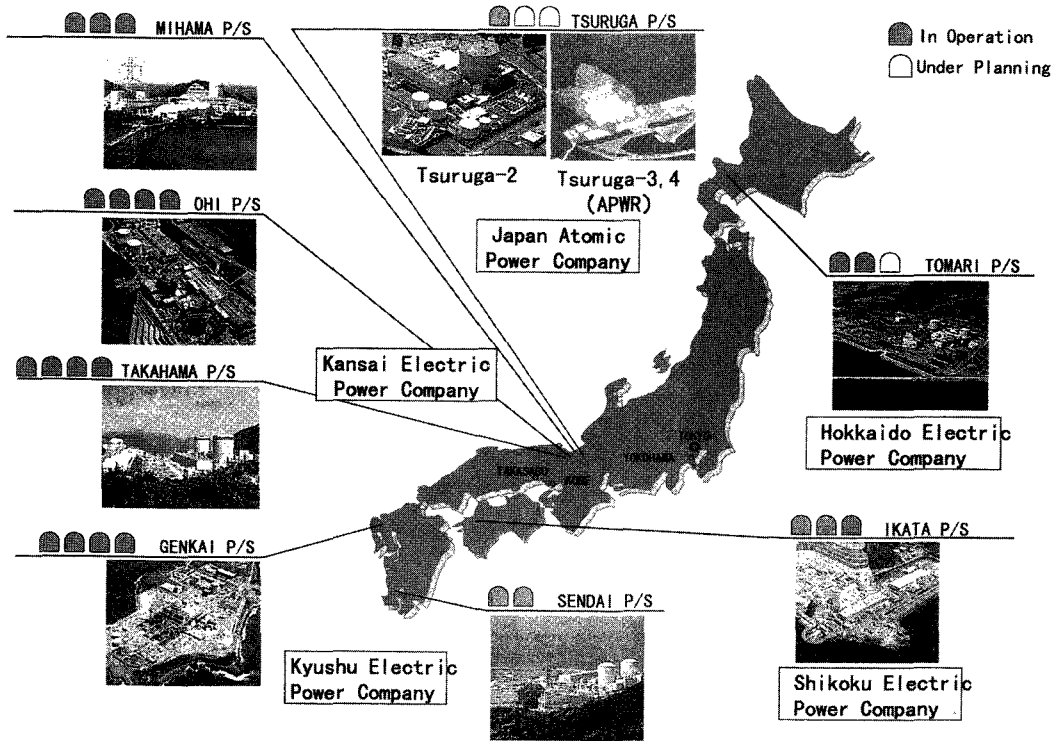
러나, 신규 원전에서는 안전 계통으로서 보호 계통을 포함하는 모든 계측 설비에 완전한 디지털 기술이 사용되었다(그림 2).

원전의 안전성 및 신뢰성을 제고하기 위하여, I&C 계통의 건전성을 연속적으로 감시하는 자기 진단 기능이 도입되었다. I&C 계통의 고장이 신속하게 검출되고, 조치들이 자동적으로 취해진다.

이중 구조로 자동 고장 검출 능력을 갖춘 다중 신호 전달 회선이 완전한 디지털 기술로 광범위하게 채택되며 이것은 또한 요구되는 케이블의 양을 절감시킨다.

주제어실에서 Man-Machine 인터페이스 및 신뢰성을 개선하기 위하여 새로운 개량형 주제어반과 콘솔이 개발되었다(그림 3).

우선 기능 정보와 그들의 관련 공정 변수들이 3-level 칼라로 구분된 큰 디스플레이 패널에 그래픽으로 표시되는 발전소 계통에 전해진



〈그림 1〉 Japanese PWR Plants

다.

운전 조치들은 터치-스크린 방식으로 컴퓨터에 입력된다. 통합 운전 감시가 운전을 단순화하도록 필요한 감시 정보가 수집되어 운전 스크린에 나타난다.

그러므로 감시 및 운전의 업무 부담이 30% 감축되고, 인적 실수는 50%까지 감소된다.

2. 저압 터빈용 54인치 ISB

저압 터빈용 54인치 ISB (Integral Shroud Blade) 최종 블

레이드가 채택되었다(그림 4). ISB는 개별 블레이드 및 슈라우드의 통합 구조로서 정격 회전시 슈라우드가 서로 접촉하도록 함으로써 원주 방향으로 하나의 연속적인 블레이드와 동일하게 된다.

54인치 ISB는 52인치 ISB를 토대로 개발되었으며, 블레이드의 연장을 통한 고성능뿐만 아니라 블레이드의 진동 강도 개선을 통한 신뢰성을 가져온다.

54인치 종단 블레이드는 터빈이 고성능과 신뢰성을 갖는지 실증하

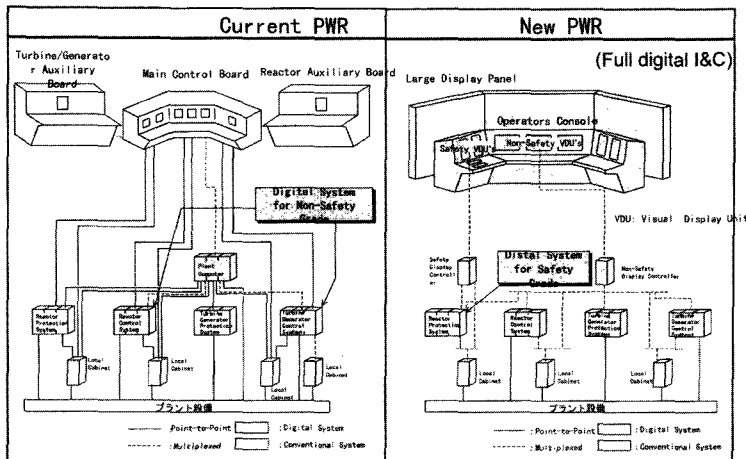
기 위하여 진동 시험 및 실제 부하 시험을 거쳤다.

3D-CAD 방법 개선

MHI는 고품질 설계가 안전성 및 신뢰성뿐만 아니라 원전 건설 비용에도 필수적이라는 인식하에 설계 품질을 개선하고 있다.

설계 개선 및 향상을 위하여 MHI는 3D-CAD 기술을 포함하는 기본 설계에 Front-loading 및 동시 설계를 채택했다.

Integrated Digital Instrumentation and Control System / Comparison of Overall Architecture



〈그림 2〉 Integrated Digital Instrumentation and Control System/Comparison of Overall Architecture

림 5).

이것은 건축 설계 및 세부 기계 장치 설계를 시작하기 전에 3D-CAD 설계가 입증되고 개선될 수 있게 한다.

Front-loading을 진전시키기 위하여 3D-CAD에 입력되는 건물 배치, 계통 설계, 전기 설계 및 기기 개략 설계 같은 모든 관련 설계가 또한 진전한다. 그러므로 미쓰비시의 모든 설계 부서가 Front-loading 설계에 총체적으로 참여한다.

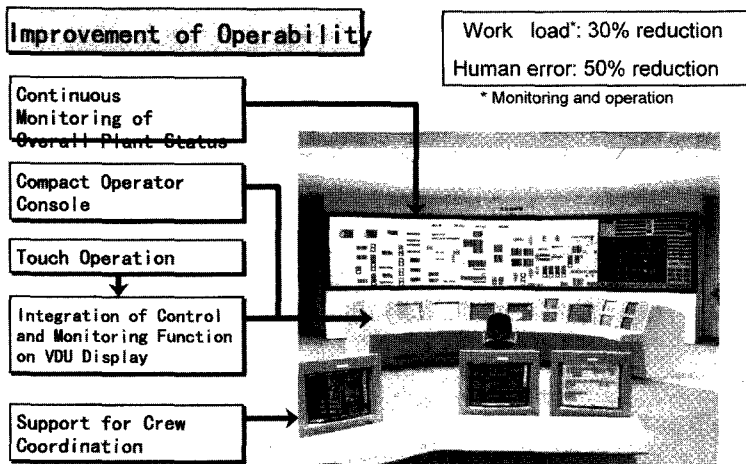
미쓰비시는 세부 설계가 이미 입증되고 확정된 기본 설계에 바탕을 둬서 나중에 재설계의 필요성을 피하는 새로운 설계 방법에 의하여 설계 부적합이 감소될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

2. 동시 설계

원자력발전소를 설계하고 건설하는 데에 대략 10년이 소요된다. 그러므로 기본 설계가 시작되었다 하더라도, 후속 상세 설계가 지연되거나 피드백 정보가 기본 설계에 반영되지 않을 수도 있다.

그러므로 MHI는 신규 원전을 위한 동시 설계를 채택했는데 이것은 세부 설계·제작·건설 및 운전같은 다양한 분야의 설계자가 기본 설계 단계에 참여하도록 한다.

동시 설계 및 Front-loading 방식을 깨달음으로써 새로운 설계 방

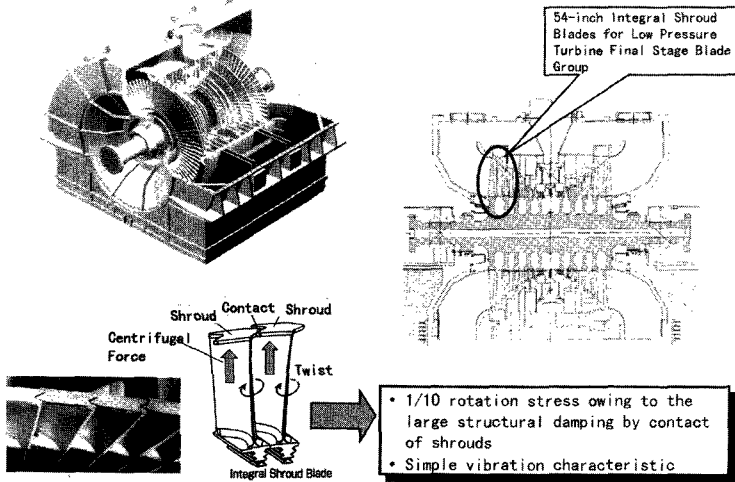


〈그림 3〉 Integrated Digital Instrumentation and Control System/Advanced Main Control Board

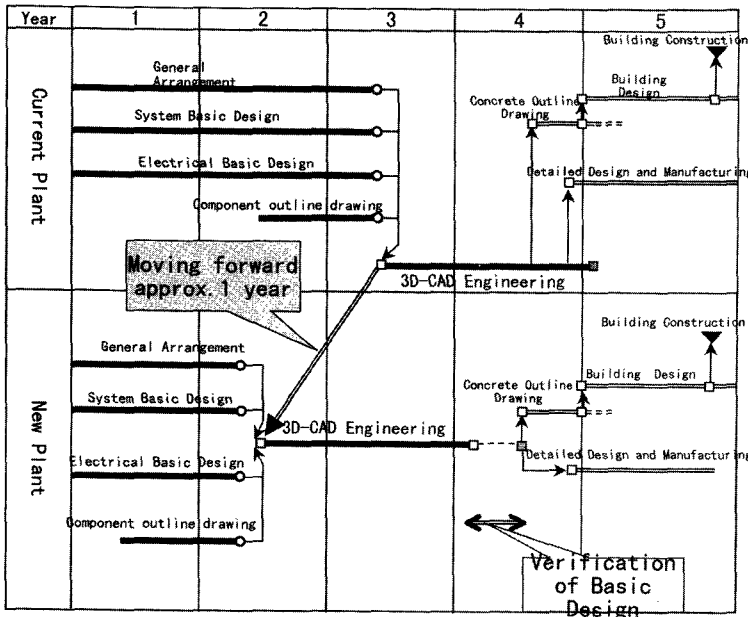
1. Front-loading

Front-loading은 설계의 초기 단계에 집중함으로써 기본 설계가 확정된 이후 어떠한 설계 변경도 예

방하는 개념이다. 신규 원전의 설계에 있어서 원전 설계의 핵심인 3D-CAD 설계는 과거 원전 설계와 비교하여 약 1년 정도 진전했다<그



〈그림 4〉 54-inch Integral Shroud Blade for Low-Pressure Turbine



〈그림 5〉 Front Loading Design Method

법을 순조롭게 진전시키도록 하는 의식 개혁을 이룩해 왔다.

상세 설계측의 엔지니어들도 그들 자신의 컴퓨터에서 3D-CAD를 이용하는 설계를 확인하고 연구할 수 있는 환경이 조성된다(그림 6). 고객들도 또한 그들의 사무실에서 운전 관점의 3D-CAD 내용을 검토할 수 있다.

3D-CAD 시스템의 개선

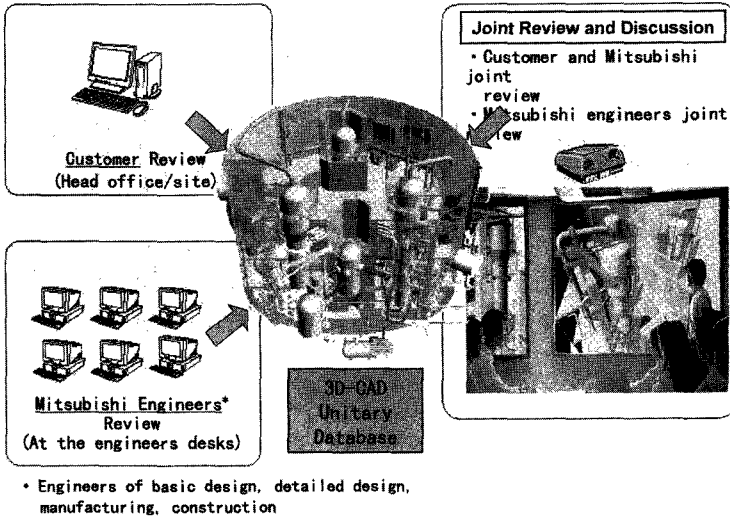
1. 발전소 설계 지원 시스템

PWR 건설이 일본에서 일시적으로 중단된 이래, 23개 발전소의 설계 및 건설에 직접 경험있는 젊은 엔지니어가 거의 없는 현실이므로 그들이 관련 기술을 습득할 수 있도록 3D-CAD 시스템에 가능한 한 자주 경험에 토대한 전문 기술 및 이론적 근거를 포함하는 것이 필요하다.

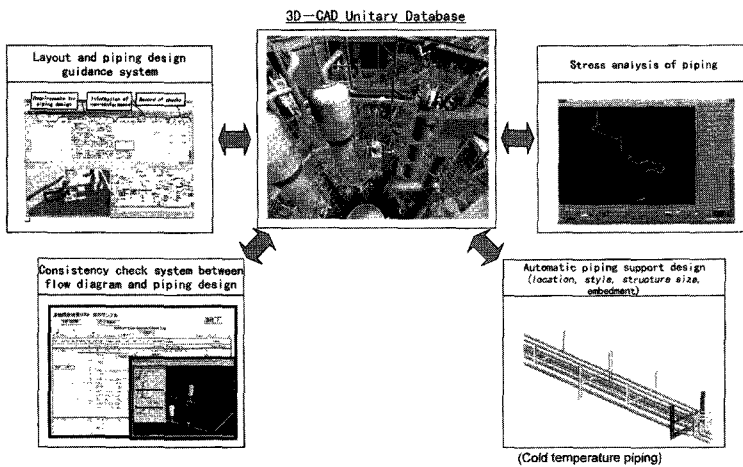
3D-CAD 시스템에서 만들어진 발전소 설계 지원 시스템(그림 7)과 관련하여, 배치 및 배관 설계의 요건과 부적합 사례 자료가 3D-CAD 시스템에 입력되어 있는데 이것은 나중에 설명한다.

흐름도와 배관 설계의 일관성을 점검하는 시스템을 이용하여 단순한 오류를 예방하는 체제가 확립되어 있다.

한편 설계 경험과 상당한 설계 시간을 요하는 저온 지지대의 설계에



〈그림 6〉 Concurrent Engineering/Concurrent 3D-CAD Review



〈그림 7〉 Plant Engineering Support Systems

대하여 경험이 거의 없는 젊은 엔지니어조차도 효율적으로 설계할 수 있도록 지지대 자동 설계 소프트웨어가 개발되었다.

수많은 설계 연구를 요하는 배관 해석에 있어서는 3D-CAD로부터의 배관 자료를 이용하여 간단히 해석 모델을 만드는 방법을 고안했다.

3D-CAD 시스템에서 생성된 배치 및 배관 설계 시스템에서 〈그림 8〉 관련 항목을 클릭하면 설계측으로부터 배치 및 배관 설계의 요건들과 이전 발전소에서의 부적합 사례들이 나타나며, 관련 흐름도가 또한 나타난다.

점검 결과에 어떤 문제도 포함되어 있지 않으면, Check Records에 점검 일자 및 점검자 성명이 입력된다. 그러므로 계통 설계의 요건들이 올바르게 반영되고 이전 부적합에서 발생한 동일한 오류가 반복되지 않는다.

3D-CAD의 내용들이 과거 PWR 설계와 비교하여 개선되었다. 지하 매설 배관이나 기타 계측 배관을 포함하는 도관이 3D-CAD에 입력되어 있는데, 과거에는 컴퓨터의 기억 용량과 처리 속도의 한계로 입력하기 어려웠다.

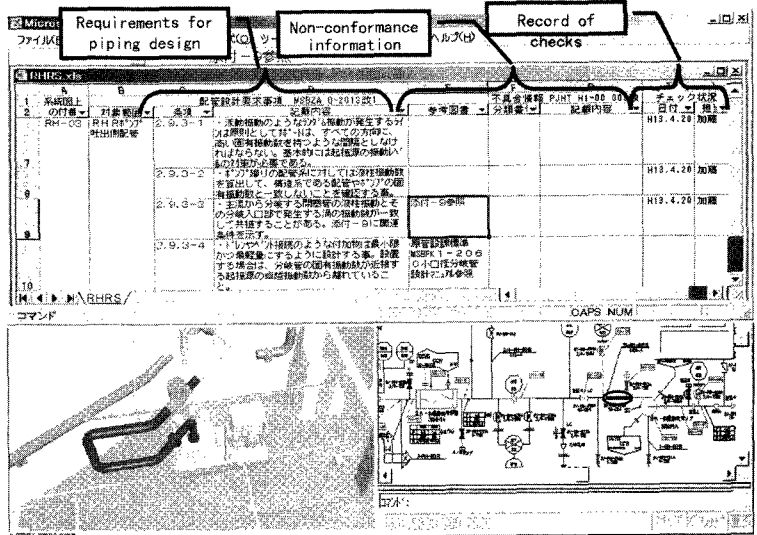
또한 새로운 3D-CAD 자료는 발전소 정지시 냉각수 배수 및 충수에 필요한 부분 배수 밸브 및 배기 밸브와 기기 정비를 위한 공간의 지시를 포함한다.

과거 발전소에서는 예기치 않은 부적합이 3D-CAD에 입력되지 않은 항목에서 발생했다. 그러나 간섭 조정을 필요로 하는 모든 설비들이 설계의 정확성을 개선하기 위하여 입력될 것이다.

2. 상세 설계 지원 시스템

통합 3D-CAD 자료를 이용하여 세부 배관, platform, 저온 배관 지지대, 고온 배관 지지대, 덕트 및 철강 플레이트/콘크리트 구조물의 설계를 직접적으로 구상할 수 있는 소프트웨어가 개발되었다(그림 9).

인터페이스 오류를 배제함으로써, 높은 정확성의 상세 설계가 실현되고 동시에 합리적인 설계가 이루어진다.

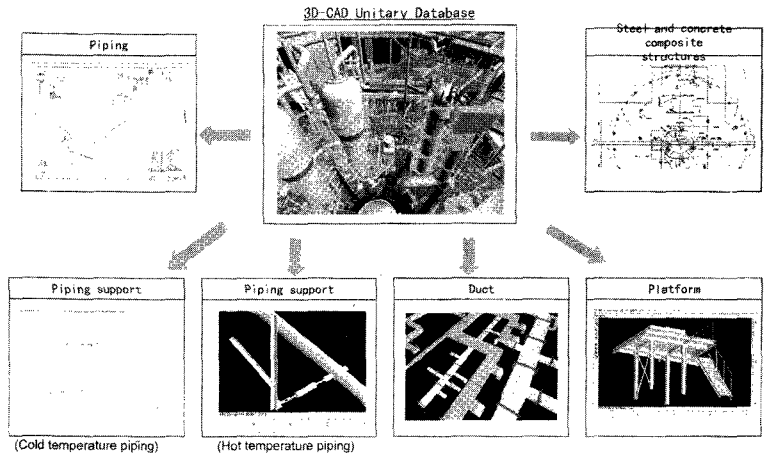


(그림 8) Layout and piping design guidance system

3. 3D-CAD 통합 데이터 베이스의 활용

상세 설계에 이어 3D-CAD에 의해 생성된 자료가 자재 관리, 배관 제작 및 검사에 이용된다(그림 10). 그러므로, 제작 현장까지 철저히 중앙에서 수집된 자료가 배포됨으로써 품질 개선 및 합리화가 이루어진다.

특히 배관에 있어서 자재 창고로부터 인수·표식·절단 및 경사 공정 같은 운영 절차가 3D-CAD 자료에 따라 자동적으로 수행된다(그림 11).



(그림 9) Detailed Design Support Systems

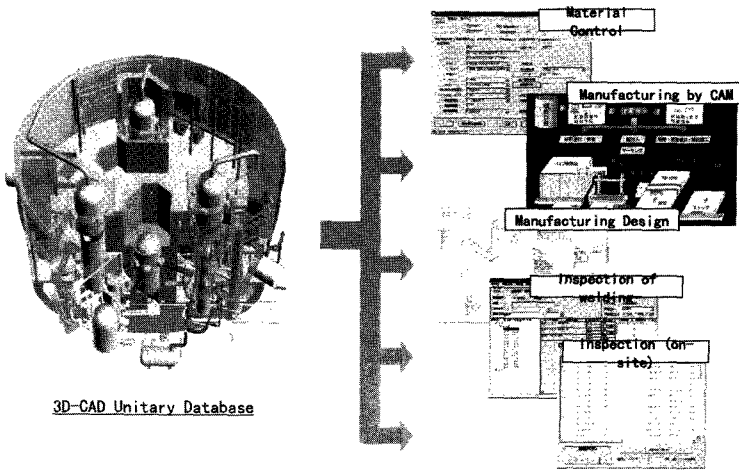
사업 관리 개선

이전 발전소에서는 설계·제작 및 건설에 관련된 전체 사업 일정 MHI가 개발한 IPS(Integrated Project Schedule Management System)에 의해 수행되었다.

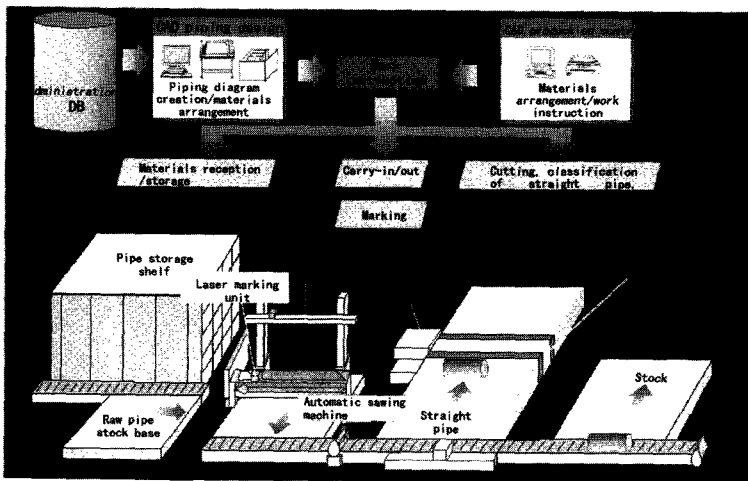
이 시스템은 전체 사업에 걸쳐 주

요 일정을 관리하는 데에는 매우 효과적이다. 그러나 기본 설계·상세 설계 및 품목 조달이 개략적으로 관리되기 때문에 그러한 시스템은 세부적으로 설계 자료에 대한 일정을 관리할 수 없다.

제작 및 건설 일정 관리를 위한 과거 보조 시스템에 추가하여 MHI는 설계 자료 및 자재 조달 관리 보조 시스템을 개발했는데(그림 12), 이것은 기본 설계·상세 설계 그리고 도면 및 항목에 따라 조달되는



〈그림 10〉 Application of Unitary Database to Material control, Manufacturing and Inspection



〈그림 11〉 Piping CAD/CAM machining Line based on the 3D-CAD database

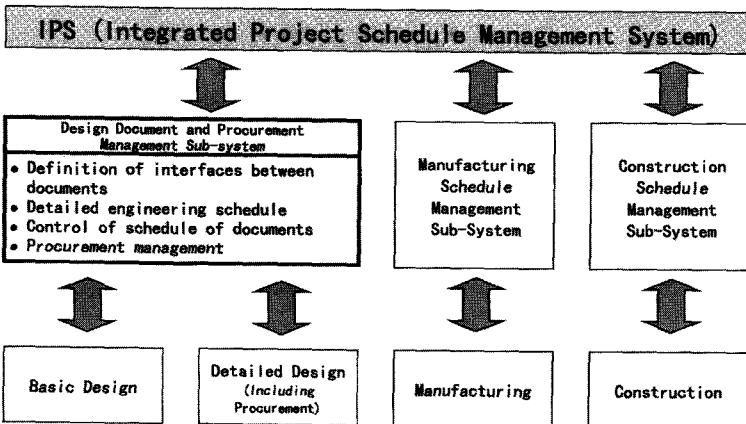
품목의 인터페이스를 통제함으로써 일정들을 개별적으로 조정할 수 있다.

이 시스템은 설계 자료 중에 상호 인터페이스를 명확히 함으로써 세부 설계 과정의 준비가 입력 및 출력과 각각 연계될 수 있게 한다.

어떤 도면의 발행이 지연된다면, 이러한 지연에 영향있는 자료를 쉽게 찾는 것이 가능하다. 시간 손실 없이 필요한 조치를 취함으로써 설계 과정이 복원된다.

대부분의 경우에 부적합은 지연된 정보와 관련된 순방향 인터페이스에서의 오류에 의해 유발된다. 그러므로 이 시스템은 또한 부적합의 발생을 감소시키도록 기대된다.

〈그림 13〉과 〈그림 14〉는 특정 도면의 인터페이스에 관한 정의의 예와 상세 설계 일정을 각각 보여준다.



건설 방법

건설 방법으로서 공장에서의 제작 범위가 가능한 한 많이 증가하고 있으며, 작업 공정을 줄이기 위한 새로운 작업 방법이 연구되고 있다.

과거 PWR (4-loop, 1,180 MWe)의 최초 콘크리트에서 상업 운전까지 건설 기간이 48.5개월이었다. 과거 PWR에 적용된 건설 방법을 토대로 하면, APWR의 건설 공기는 대규모 용량임을 고려할 때

〈그림 12〉 Design Document and Procurement Management Sub-system

55개월로 예상된다. 이러한 이유로 MHI는 초중량 크레인을 이용함으로써 48개월 이내로 건설 기간을 단축하기 위한 연구를 추진할 예정이다.

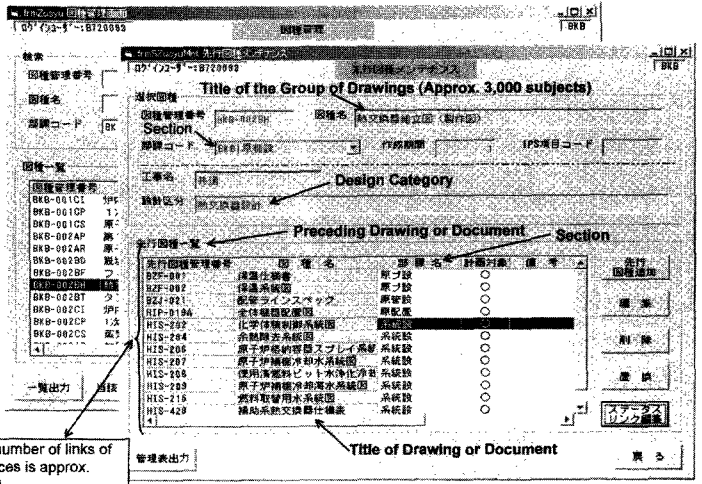
예를 들어, 초중량 크레인을 이용하면 한번에 PCCV 돔 라이너를 옮기고, 격납 용기·강철 플레이트 및 콘크리트 구조물을 준공하기 전에 증기발생기 및 원자로 압력 용기를 격납 용기 내에 옮길 수 있으며, 대규모 모듈의 주중기 배관과 건축 철강 프레임 등을 옮길 수 있다.

현장 작업 및 공정 양을 더욱 줄이기 위하여, MHI는 초중량 크레인을 이용하여 운반되는 배관 모듈들을 가능한 한 많이 사용할 예정이다.

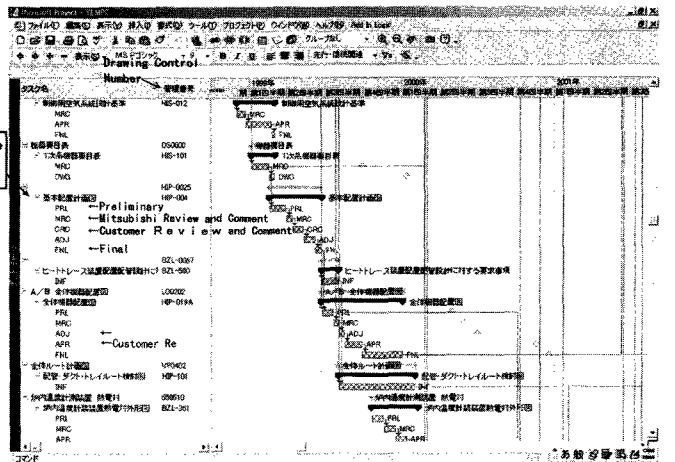
결론

미쓰비시는 품질과 효율성 면에서 신규 원전의 설계·제작 및 건설과 사업 관리를 근원적으로 개선하기 위하여 23개의 PWR 설계 및 건설 경험을 활용해 왔다.

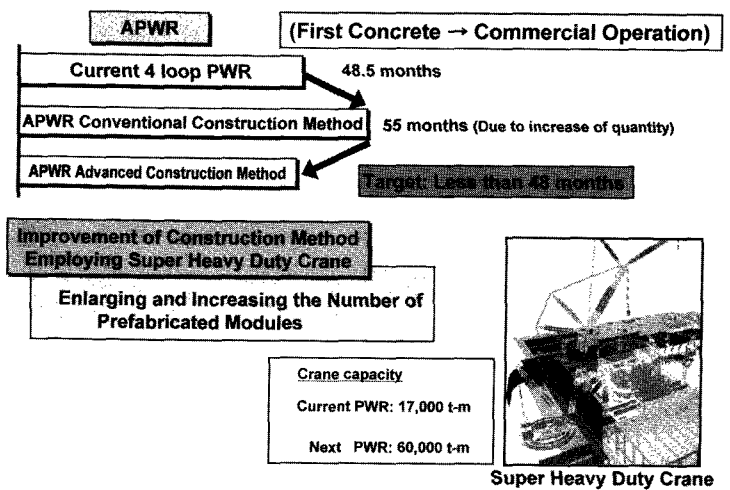
총체적인 관리 및 운영을 통하여, MHI는 현재 안전성 평가중이거나 곧 진행될 도마리 3호기 및 쓰루가 3·4호기의 안전성과 신뢰성을 제고하고 순조로운 발전소 건설을 추진할 예정이다.



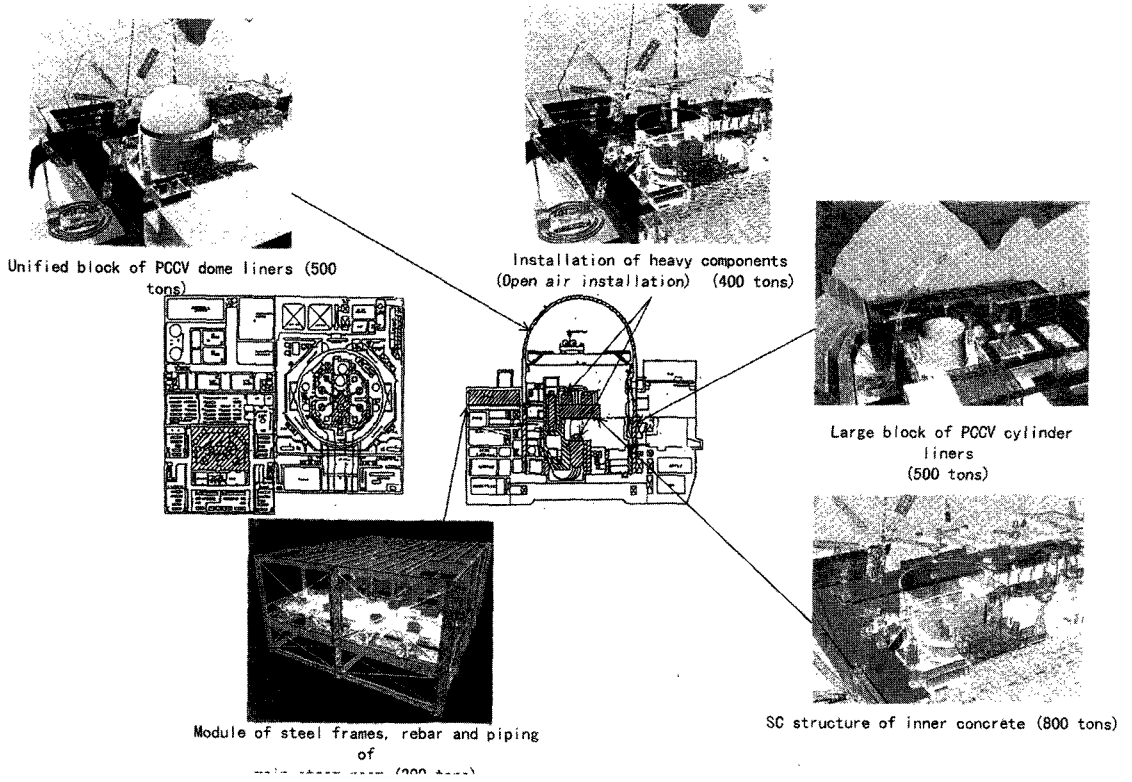
(그림 13) Definition of the Interfaces Between Drawings and Design Documents



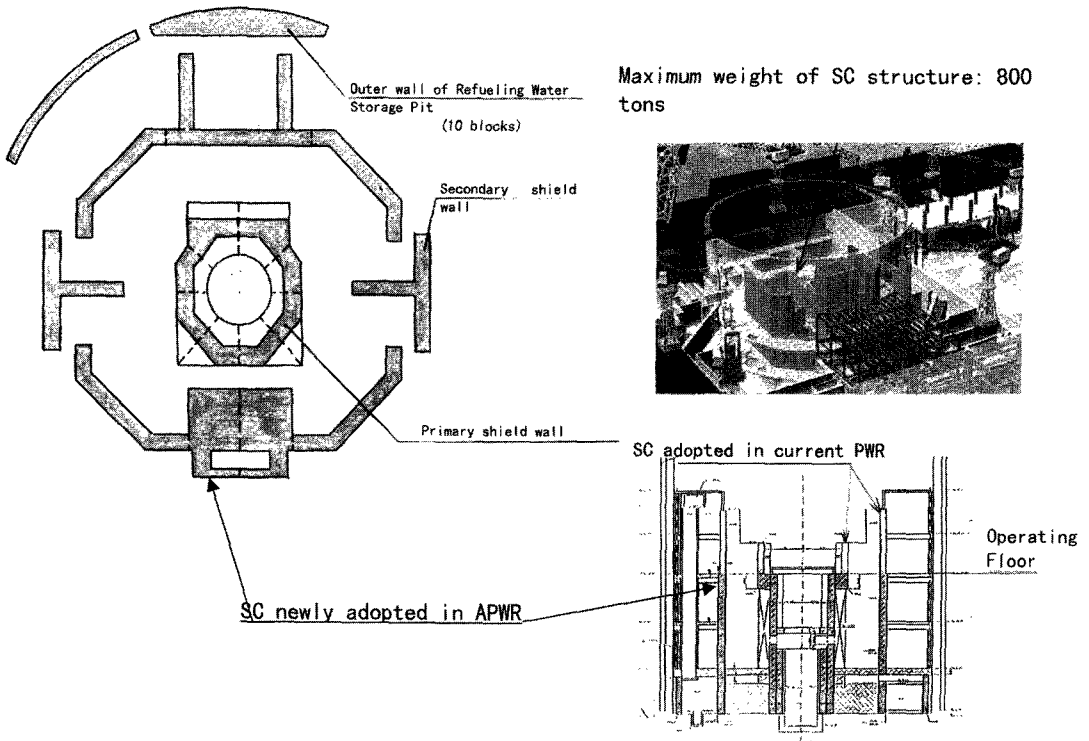
(그림 14) Detailed Engineering Schedule Generated from the Definitions of Document Interfaces



(그림 15) Construction Schedule of APWR



〈그림 16〉 Advanced Construction Methods Planned for Next APWRs



〈그림 17〉 SC(Steel and Concrete Composite structure)