

# 原電設計, 建設, 施工技術의 高度化

林 勉 <(株)日立製作所 原子力플랜트建設部長>  
 清水 洋二 <(株)東芝 原子力建設部長>

## 1. 序 論

日本 最初の 商業用 輕水爐發電所의 建設은 1967년 2 월에 建設을 착수하여 1970년 3월에 商業運轉을 개시한 日本原電의 Tsuruga 1號機(375MWe, BWR)이며, 뒤이어 關西電力의 Mihama 1號機(340MWe, PWR), 東京電力의 Fukushima 1號機(460MWe, BWR)가 建設되어 1970년 11월 및 1971년 3 월에 각각 상업운전을 개시했다.

최초 몇基의 상업용 경수로발전소 建設은 일본의 製作業體 참여와 더불어 主契約者가 外國 회사였다. 일본은 建設經驗을 얻은 후 일본회사를 주계약자로 선정하여 국내에서 설계된 원자력발전소를 建設했다. 元來 設計의 改良과 建設기법의 개발이 일본 政府의 지도아래 시공회사, 제작업체, 전력회사의 협력을 통하여 이룩되었으며, 이 노력의 成果로 현재 32基의 발전소가 높은 효율로 운전중에 있다. 그외에 改良된 경수로발전소 建設을 측정하기 위하여 다음과 같은 계획이 開發될 것이다.

- (1) 標準化의 開發과 調整
- (2) 발전소 계통설계의 합리화
- (3) 建設공기의 단축
- (4) 합리적인 품질관리의 개발

다음은 BWR發電所 建設工期 短縮을 위한 設計, 建設, 施工方法의 改良을 概述한 것으로서, 특히 發電所 製作業體와 施工會社의 作業面에

중점을 두었다.

## 2. 日本 BWR發電所 建設의 特徵

### 2.1 日本과 外國의 契約締結 差異

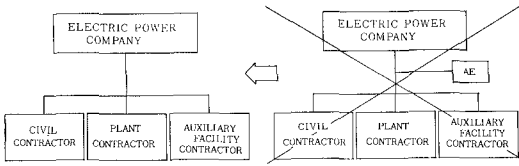
원자력발전소 建設에 대하여 日本에서는 전체적인 契約管理를 맡는 用役會社는 고용하지 않으며, 그 대신 施工業體와 製作業體는 電力會社와 체결한 계약에 따라 각각의 책임맡은 업무를 수행한다. 이러한 發電所契約者와 施工契約者는 매우 밀접하여 상호협조하에 발전소 설계 및 시공을 수행한다. 이러한 契約管理 組織은 전력회사가 발전소 운전, 보수, 기본건설계획에 그 경험을 반영하여 수행하고, 시공업체 및 발전소계약자는 실제 建設에 그들의 경험을 이용함으로써 이상적인 발전소 건설개념을 구성하는 것이다. 이들 제작업체·전력회사·시공회사의 단합된 노력에 의한 전체적인 발전소 설비의 설계계획은 그림 1 과 같다.

이러한 연관된 3者間의 협력조직은 최초 설계단계에서 부터 긴밀해질 수 있으며, 발전소 건설이 시작된 후에도 상호 최선의 조정과 협력을 이루는 데에 기여할 수 있는 것이다.

### 2.2 高度의 耐震設計 要求

地震이 자주 일어나는 日本은 우수한 내진설계를 가진 발전소를 필요로 하며 기기 및 건물들은 특수한 내진시험기법을 사용하여 설계되어 진다. 建物은 heavy Con'c 기초를 해야 하

(그림 1) 契約上の 組織



고, 機器 및 配管들은 heavy support 構造物을 필요로 한다. 이러한 이유로 설치자재의 물량이 증가되므로 합리적인 建設工期의 短縮이 더욱 요구된다.

### 2.3 作業能率向上 動機 誘發

原子力發電所 建設期間은 매우 길므로 건설 공사의 최초 목표인 建設期間의 단축은 모든 작업자가 그들의 작업업무에 대해 열의를 갖고 성의있게 작업을 계속할때 성취될 수 있다. 다음은 發電所契約者가 이러한 목적을 달성하기 위하여 개발한 방법이다.

(1) 각 작업반에 위임되어 수행되는 단위작업의 결과를 주기적으로 발표하는 서클 活動方式을 채택하였다. 이 方式은 作業그룹基準으로 설정된 각 소단위 작업반에 세부작업계획이 할당되며, 그 소단위 그룹들은 어려운 일도 명예심을 갖고 작업완료 목표일을 자발적으로 설정하여 작업을 수행하는 것이다.

(2) 作業方法改善提案方式이 작업수행의 열의를 증진시키기 위하여 도입되었다. 이 방식의 성과는 적절히 평가되고 포상으로 격려된다. 즉, 이 방식은 작은 성과의 종합적용방안을 격려하기 위하여 고안된 것이다.

(3) 發電所 建設作業 從事者間에 우호적인 조화를 이룰 목적으로 모든 가능한 방법이 고안되었다. 이러한 목표달성을 위한 대표적인 행사는 모든 참가자들이 친선도모를 위한 방법의 하나로 육상경기에서 마라톤 경주와 같은 것이

다.

더 나아가 建設作業中에 주요한 工程 作業이 완료되었을때(예를 들면, 原子爐 設置) 이것을 기념하는 다양한 행사가 거행된다. 이런 행사는 중요한 작업단계들의 완료를 표시하는 방법으로서, 또 관련된 작업수행을 위한 자극을 불어넣기 위하여 계획되었다.

## 3. 設計技術의 改善

### 3.1 設計의 早期着手

日本에서 채택되고 있는 認許可體制에 의해서 인허가신청은 각 작업진행단계에서 建設許可 및 原子爐設置許可를 제출해야 하며, 이들의 허가가 난 후에 실제작업을 착수할 수 있다. 기본설계의 승인과 관련한 이러한 절차는 때로는 3년을 필요로 한다. 이러한 주변여건하에서 電力會社는 계획된 建設着手時點보다 약 3년전에 事前作業指示를 발급함으로써 이때부터 제작업체와 시공회사는 기본계획의 준비에 착수한다. 주된 基本計劃은 다음과 같다.

- (1) 發電所 系統
- (2) 安全性
- (3) 耐震設計
- (4) 방사선 차폐
- (5) 발전소 배치
- (6) 기타

電力會社가 건설허가신청을 제출하기 전에 제작업체는 다음의 기본설계를 완성하고 詳細設計을 준비하여야 한다.

- (1) 건축설계
- (2) 기기설계
- (3) 배관, 전선 및 덕트설계
- (4) 計裝 및 전기설계
- (5) 기타 설계

원자력발전소 건설과 관련하여 施工會社와 製作業體는 電力會社와의 契約에 따라 시공회사는 건물시공을 수행하고, 제작업체는 기기 및

설비의 設置作業을 수행한다.

3.2 設計方法的 改善(모델設計와 3D-CAE)

原子力發電所 建設工程을 잘 진척시키기 위하여 施工着手 이후 설계변경을 최소화시켜야 되며, 이를 위해서는 설계단계기간부터 종합적인 검토가 매우 중요하다. 이 목적을 위하여 실제 발전소 전체의 1/5~1/25 규모의 모형설계를 사용하여 발전소 설계를 수행한다.

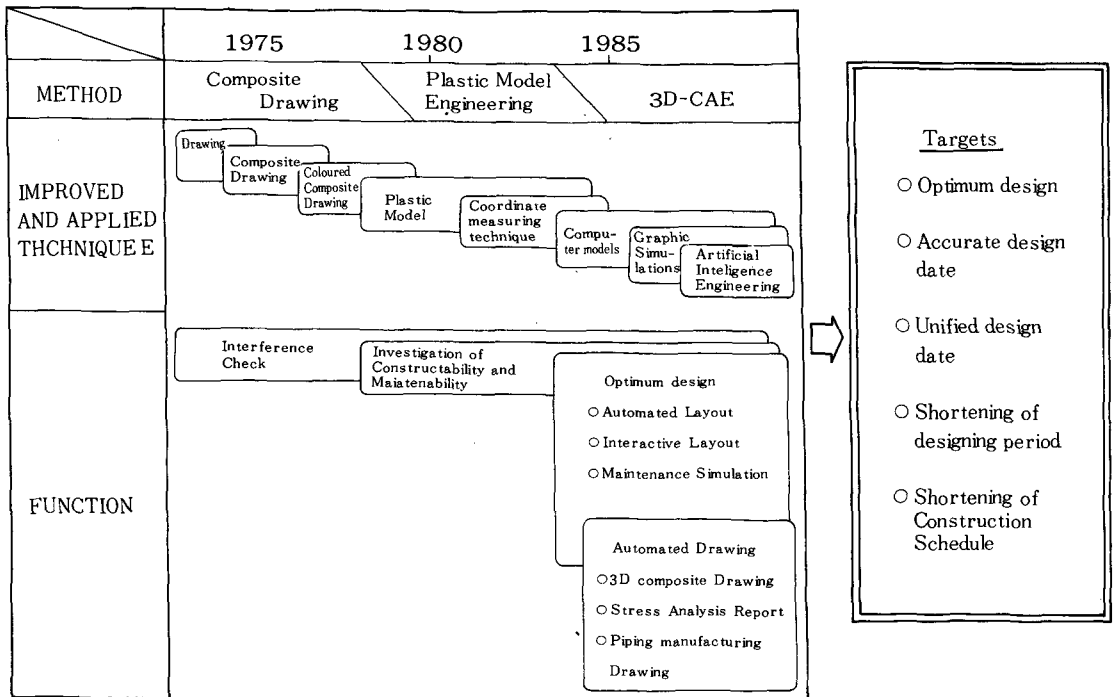
이러한 모형설계를 이용하여 發電所契約者, 施工契約者, 電力會社로 이루어진 3개 파트에서 점검과 검토가 되풀이 된다. 이러한 일들함으로써 보수를 위한 이상적인 작업공간의 확보, 최적의 기기설치계획, 건물 구조물과 기기간의 조화있는 배치 등의 면에서 작업효과를 크게 향상시킬 수 있다. 이러한 방법으로 발전소 건설 착수 이후 設計變更을 보다 더 최소화하는데 기여할 수 있는 것이다. 발전소 설계과정에 대한 설계방법의 변경과정은 그림 2와 같이 1975

년의 후반부터는 설계도면이 복잡구성도면으로 사용하던 것이, 지금은 모형설계방법으로 대체되고 있다. 3D-CAE가 가장 인기있는 방법이다. 배관계통의 자료, 건물 구조물의 자료 및 기기배치의 자료 등을 사용하여 기술자에 의해 작성된 automatic routing system, 3D-CAE에 의한 interactive layout system 및 3D graphic simulation system이 이루어지며 또한 배관계통도면을 작성할 수 있는 것이다. 현재는 모형설계에서 3D graphic simulation system으로 대체되고 있으며, 사람의 접근, 밸브조작, 장비이동, 보수 등의 작업 측면에서도 완벽한 점검이 가능하다.

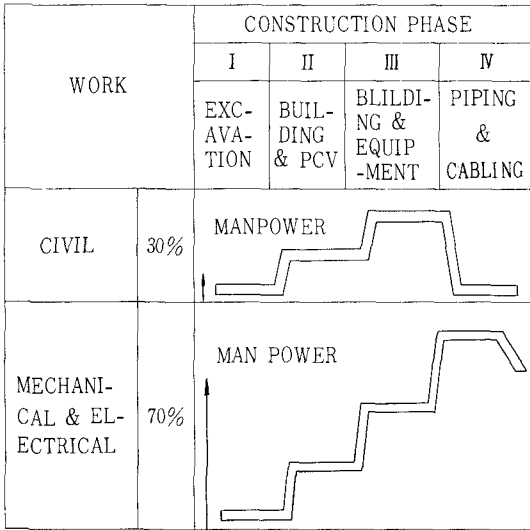
4. 建物施工 및 設置改良

그림 3에서 보는 바와 같이 발전소 건설은 발전소 기초굴착과 같은 토목작업으로 시작해서 건물시공으로 이어진다. 建物施工과 함께 製作

(그림 2) 最新 發電所 設計方法



〈그림 3〉 建設에서의 人力分布



業體의 설치작업이 시작된다.

製作業體, 施工會社, 電力會社 3者는 다음과 같은 판정을 기준으로 중요시공도면작업에 대해 다양하고 새로운 건설기술을 개발하는데 노력한다.

- (1) 병행작업의 확대
- (2) 작업량의 감소
- (3) 작업 생산성의 향상

#### 4.1 土木 및 構造物 作業의 改善

건설초기단계에 주요공정을 형성하는 토목 및 구조물 작업의 개선은 다음과 같다.

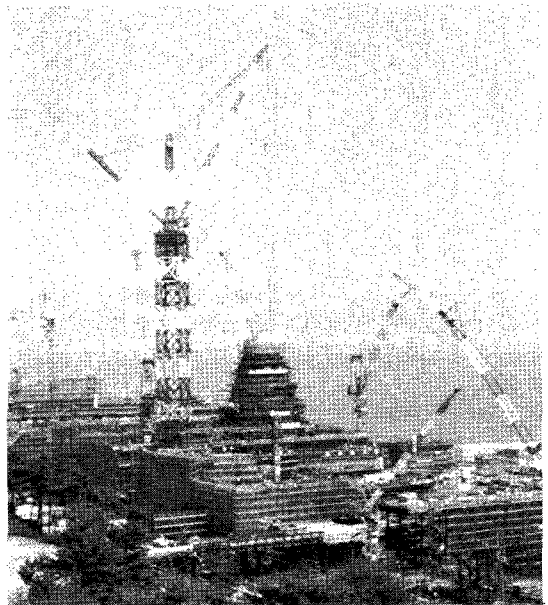
##### 4.1.1 수직굴착작업방법

토목작업과 구조물 작업사이의 상호관계의 예로 建物施工을 위하여 상당한 깊이까지 수직으로 땅을 파야하는 굴착작업에서 흙을 받치고 있는 벽에 tie-back anchor를 박으면서 수직굴착작업을 수행하는 tie-back技術을 사용한다. 이러한 방법의 장점은 파야할 흙의 양을 감소시켜 주고, 건설장소에 접근이 용이하며, 건설작업장 부근에 충분한 작업장소를 확보할 수 있으며 또 건설기간을 단축할 수 있다.

##### 4.1.2 전천후건설방법(철근구조물 조기 조립

방법)

建物建設時 크레인을 설치하고, 그런 다음 통상적으로 크레인은 자재를 운반하고 들어올리는데 사용한다. 일본에서는 바다를 따라서 북쪽지역에 발전소를 건설하는데, 이 지역은 겨울철에 발전소 건설에 극히 나쁜 기후조건을 가지고 있다. 겨울에는 강풍으로 인해서 크레인을 운전하는데 제한을 받으며, 추운 날씨로 해서 콘크리트를 타설하는데 제한을 받고 또한 폭설이 문제가 되고 있다. 그러므로 겨울철에 대처할 조치가 요구되고 있다. 그 한가지 방법은 전천후건설방법(철근구조물 조기조립방법)이다. 굴착작업후 철근구조물이 설치되며, 이러한 철근구조물은 건물의 벽과 슬라브에 설치된다. 그리고 内部構造物의 지붕에 큰 설비를 넣을 수 있도록 크고 이동 가능한 공기 cushion을 설치한다. 지붕의 나머지 부분은 이동 가능한 deck plate로 덮는다. 이와 같은 방법을 적용하면 바람과 눈을 방어할 수 있으며, 일년 연중 건설을 계속할 수 있다. 철근구조물을 사전에 조립하는 것과 같이 리바 제작용 hoist monorail과 같은 것도 철근구조물과 같이 조립하여 동시에



시공할 수 있다.

#### 4.1.3 텍크 플레이트 使用

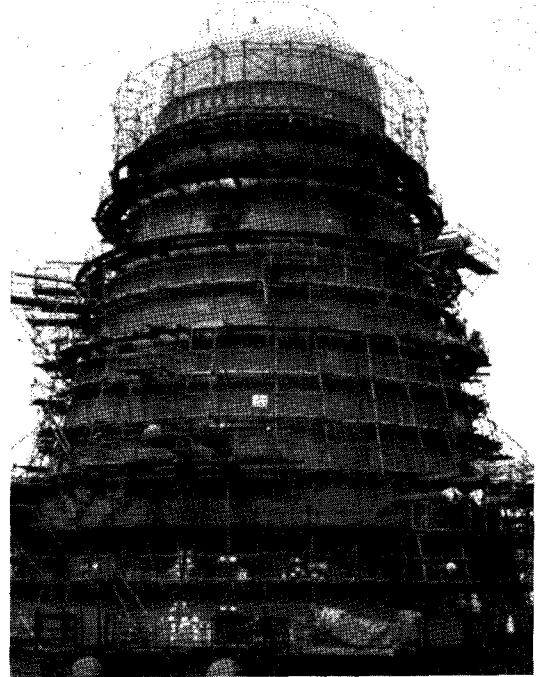
原子力發電所建物は 방사능 차폐의 관점에서 콘크리트로 건설한다. 건물바닥 설치완료 후에 발전소제작업체는 機器와 配管의 설치에 착수한다.

통상적인 방법으로는 슬라브 설치를 위해 떠받치는 지지대를 사용하며, 다음으로 형틀과 리바를 제작한 다음 콘크리트를 타설한다. 그후 약 1個月間의 콘크리트 양생후 떠받치는 지지대와 형틀을 제거하며, 발전소제작자는 기자재의 설치작업에 착수한다. 이와 같은 경우에 자재와 도구 등을 施設의 内部로 운반하기 위해 벽에 있는 많은 임시용 開口를 사용하게 된다. 그러나 이와 같은 작업은 건축 및 기계작업과 서로 작업의 방해요소가 된다. 이러한 문제를 피할 수 있는 한가지 방법이 텍크 플레이트를 사용하는 방법이다.

벽이 완료된 후에 콘크리트 타설 중량을 이겨낼 수 있을 만큼 충분히 강력한 철근빔을 설치하며, 그리고 형틀 대신에 철근 텍크 플레이트를 사용한다. 이러한 방법으로써 機器와 配管을 좀 더 일찍 운반할 수 있으며, 콘크리트 타설에 앞서 자재를 운반함으로써 機器設置作業을 좀 더 일찍 착수할 수 있다.

#### 4.1.4 리바의 事前製作

일본에서 발전소들은 높은 地震強度에서도 견디어낼 수 있어야 하므로 리바의 수는 많으며, 이들 製作作業은 복잡하고 많은 시간이 걸린다. 이러한 작업을 용이하게 하기 위해 발전소내 제작소에서 리바를 사전에 제작한다. 이 경우 자동기계가 사용되며 生産性 向上 및 高度의 安全性을 기할 수 있다. 또한 事前組立方式을 확대하기 위하여 철근연결기술도 개선되었다. 이미 설치된 철근에 事前組立된 철근을 손쉽게 튼튼하게 연결하기 위해서 기계적 철근연결방식이 사용되었다.



### 4.2 機器設置方法的 改善

#### 4.2.1 機器 및 配管設置方法的 改善

발전소기계제작업체의 設置作業은 建物設置와 병행되며, 건축작업과 기계작업을 통해 건설공기를 최대한 단축시킬 수 있을 것으로 기대된다. 工場에서 事前組立되는 배관 및 기기의 크기는 발전소건설현장까지의 운송문제와 발전소건설현장에서 사용되는 취급장비들에 따라 제한되어 진다.

최초의 여러 발전소의 경우에 있어서는 구조물 작업을 위한 크레인 용량이 작아(60~70톤) 대부분의 작업은 建設現場되었고, 建設工期도 길었다. 1980년에 130톤 타워 크레인(800t-m)이 개발되었으며, 1985년에 1,100톤 데릭 크레인과 840톤 crawler크레인이 사용 가능케 되었다.

점차적으로 容量이 큰 인양기기가 사용 가능케 됨에 따라 工場作業分이 증가되었으며, 또한 機資材의 운송문제를 없애기 위하여 建設現場의 가공지역이 확장되었다. 이러한 방법으로 構

造物 및 機械作業은 분리하여 수행할 수 있게 되었으며, 建設工期도 短縮이 가능하게 되었다.

(a) 原子爐建物 PCV의 事前組立

1, 100MWe級 Mark II型 PCV의 事前組立의 경우, 각 블록은 建設現場야드에서 事前組立되어지며(최대중량 약400톤), 840톤 Crawler 크레인에 의해 운반된다. PCV 조립을 완료 하는 데에는 130톤 타워 크레인을 사용할 경우 11個月이 소요되나, Crawler 크레인을 사용하면 약 7.5개월로 단축된다.

(b) 大容量 크레인에 의한 原子爐容器(PRV) 設置

중전의 발전소에 있어 RPV는 operating floor 건설완료후 R/B operating floor에 위치한 인양기에 의해 설치되었다. 그러므로 RPV 設置工程은 建物建設工程에 영향을 받게 되므로 그후 1次系統 主要機器 設置可能時間이 충분치 못하였다. 大容量 크레인을 사용하면 RPV 설치는 건물건설공정에 구애받지 않고 구조물 작업과의 간섭도 피할 수 있다. 또한 RPV 조립은 工場에서 작업이 된다.

上記 改善事項은 建設工程을 0.5~2個月정도 短縮可能하게 한다.

(c) 配管事前組立方法

배관, 지지대, 케이블 트레이, 공기조화설비 덕트의 설치작업 등이 현장에서 발전소제작업체 작업량의 약70%를 차지한다. 이 작업을 개선하기 위하여 配管事前組立方法이 사용된다. 건설현장에서 배관을 組立하는 것보다 工場이나 現場 shop에서 組立하여 크레인으로 수송하는 것이 보다 능률적이다.

機器와 配管을 事前組立하여 인양하는데, 현재 工場에서 組立된 배관의 기본단위는 총중량 100톤까지 가능하며, 이 방법을 사용하면 작업 시간의 단축 뿐만 아니라 生産性和 安全性을 개선할 수 있다.

4.2.2 自動建設機器

배관, 지지대, 케이블 트레이, 공기조화설비 덕트의 設置作業은 作業량이 매우 많아 이 작업의 人力 절감을 위하여 自動建設機器가 사용된다. 다음은 그 實例이다.

(a) 벤트配管製作使用

벤트配管을 사용하면 建設現場에서 행할 용접개소의 수를 감소시킬 수 있으며, 배관용접을 위한 ISI작업 또한 감소시킬 수 있다. 이 벤트配管은 CAD와 CAE와 연계된 CAM을 사용하여 만들어진다. 대구경 배관의 경우 총용접개소의 약 30%를 감소시킬 수 있다.

(b) 자동용접기

現場에서 용접의 자동화에 의해 品質改善 및 人력절감을 기할 수 있고, PCV Shell(Mark - II형)의 모든 용접과 배관용접의 약70%를 용접할 수 있다.

(c) 자동전선포설기계

건설현장에서 포설되는 전선의 총 길이는 2, 500km로서 效率인 전선포설작업을 위해 자동 전선포설기계가 개발되었으며, 이 기계를 사용하여 전선포설의 기간은 90%까지 단축되고, 전선포설작업량도 단축된다.

4.2.3 構造物과 機械作業의 協調

구조물작업과 기계작업은 별도의 계약하에 수행되므로 이들의 협조가 건설에서 중대한 것이다.

(a) PCPS의 응용

電發所 運轉의 自動化에 따라 많은 전기제어 관벨이 주제어실 및 전기제어실내에 위치한다. 지금까지의 발전소에서는 건물 및 전기시설 물의 설계 및 설치가 별도로 수행되었으나, 패키 지시스템을 가짐으로써 전기제어실 바닥밑에 전선포설의 공간이 마련되며, 단자박스가 들어설 수 있고, 전선포설계획에 가변성이 증대되어 설치계획을 단축할 수 있다.

(b) 폴 라이너의 事前組立

폴 라이너는 事前組立되어 콘크리트 타설 전

〈그림 4〉 建設工期의 短縮

ITEM PLANT	FOUNDATIONAL BASEMENTS	PCV	MECHANICAL AND STRUCTURAL INSTALLATION	PIPINGS, ELECTRICAL AND INSTRUMENTATION INSTALLATION	PRE OPERATION TEST	STARTUP TEST	CONSTRUCTION TIME (MONTHS)
CONVENTIONAL PLANT (1100MWe)	COMPLETE OF R/B OPERATING FLOOR INSTALLATION						57.5
	5.5	10.9	14.6	8.5	7.9	10.1	
LATEST PLANT (1100MWe)							52.6
	4.7	9.7	14.4	7.8	7.2	8.8	

에 위치하게 된다. 이러한 방법은 콘크리트의 형틀작업 및 마무리 작업을 감소시킬 수 있다.

(c) 構造物資材 및 配管의 事前組立

施工方法이 진보됨에 따라 철재 구조물의 적용이 증가되고 있다(例, Q-덱크사용방법). 혼합건물 구조물과 배관의 모듈화가 이루어지고 있으며, 추가로 철근배관 앵카볼트의 모듈화도 계획중에 있다.

4.2.4 建設施工管理의 改善

火力發電所와 비교해 보면 原子力發電所는 사업규모면에서 엄청나게 클 뿐만 아니라 現場에서 취급되는 資材量도 비유할 수 없을 만큼 많다. 建設施工管理는 세밀하게 수행되는 건설관리에 초점을 두어 수행하며 工程管理, 品質管理, 安全管理 등에서 여러가지 단계를 고안하고 서로 일치하도록 적용시키는 노력이다.

建設現場의 施工管理를 효과적으로 개선하기 위하여 발전소제작업체와 시공자는 효율적인 건설관리를 위해 컴퓨터를 이용한다. 이러한 컴퓨터設備는 機資材의 인도일정, 시공계획의 진도 상태, 검사를 위한 각종 현황 등 건설과 관련한 각종 정보를 신속히 처리해 준다. 따라서 이러한 컴퓨터設備는 효과적으로 工程管理를 수행하는데 크나큰 공헌을 하고 있다. 게다가 건물 지역별로 발전소계약업체와 시공자 사이에

서 인도일정이 반복해서 검토되어 지는데, 이러한 검토는 근본적으로 施工作業과 機電作業과의 협조적인 조정에 목적이 있다. 또한 건설시 공작업은 발전소제작업체 및 시공업체의 참여뿐만 아니라 시공에 관련된 여러가지 보조시공을 맡고 있는 하청업체들의 참여와 더불어 일 반적으로 시작된다.

그러므로 電力會社는 주기적으로 工程會議를 개최해야 한다.

5. 結 論

本稿에서는 BWR 발전소에 대한 설계, 시공 및 설치에 관해서 기술하였으며, 이러한 과정의 결과에 따라 工期短縮이 성취되어 오고있다. 그림 4에 요약된 것처럼 標準建設工程(敷地檢査부터 商業運轉까지)은 중전의 발전소에서는 57.5個月이 소요되었으나, 현재 52~53個月로 단축되어지고 있으며, 현재 진행중인 改良型 BWR 發電所가 설계되면 1,350MWe급 발전소의 48個月 건설공기 달성도 가능하게 될 것이다.

이러한 주변여건과 관련하여 발전소제작업체는 輕水爐發電所의 信賴性, 運轉性, 補修性, 經濟性 등의 개선은 물론 새로운 技術開發을 추구하고 있다.