

原子カプラント建設工法及び工事管理の新技术と実績

Improvement of Construction Technology for BWR Plants

日立製作所が建設に関与した商業用沸騰水型原子力発電プラント(BWRプラント)は既に10基を数え、そのうち8基は建設を完了して運転中であり、2基は建設中である。更に電気出力1,100 MW級及び電気出力540 MW級プラント合計5基の建設を計画中である。

これらのプラントの建設では、建設期間が約5年と長期間にわたるだけでなく、携わる人員も約2,500人に至る膨大な量の作業消化が必要となっている。特に近年は、原子力を取り巻く種々の情勢から安全と信頼性に加えて、より経済性の高いプラントを短期間で建設するための高度化の要求が高まってきている。

本稿では、建設工程短縮を目的として新たに開発された建設工法、工事管理の流れと最近の状況について紹介する。これらの新技术の適用は、建設中のプラント及び計画プラントの大幅な建設工程短縮に貢献している。

藤本弘次* *Hirotsugu Fujimoto*
 鈴木忠男* *Tadao Suzuki*
 好永俊昭* *Toshiaki Yoshinaga*
 清水 清* *Kiyoshi Shimizu*
 赤木 信** *Makoto Akagi*

1 緒 言

通商産業省の指導による電気出力1,100 MW級の第2次軽水炉改良標準化計画のベースプラントである東京電力株式会社福島第二原子力発電所第2号機(以下、福島第二・2号機と称する。)の建設¹⁾に引き続き、日立製作所では、福島第二原子力発電所第4号機(以下、福島第二・4号機と称する。)及び中部電力株式会社浜岡原子力発電所第3号機(以下、浜岡・3号機と称する。)タービン設備の建設を、各々昭和62年8月25日及び同年8月28日に完成し、営業運転を開始した。

更に、中国電力株式会社島根原子力発電所第2号機(電気出力820 MW, 以下、島根・2号機と称する。)及び東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所第5号機(電気出力1,100 MW, 以下、柏崎刈羽・5号機と称する。)の建設に着手しており、各々昭和64年2月15日及び昭和65年4月1日に営業運転を開始する予定で建設中である。

その後の計画プラントとしては電気出力1,100 MW級の中部電力株式会社浜岡原子力発電所第4号機(以下、浜岡・4号機と称する。), 東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所第4号機(以下、柏崎刈羽・4号機と称する。), 北陸電力株式会社能登原子力発電所1号機(電気出力540 MW, 以下、能登・1号機と称する。)及び改良型沸騰水型原子力発電プラント(電気出力1,356 MW)の初号機である柏崎刈羽原子力発電所第6号機(以下、柏崎刈羽・6号機と称する。)及び同第7号機(以下、柏崎刈羽・7号機と称する。)等の建設が計画されている。

以上に述べたプラントの電気出力100万kW当たりの建設工期(マッ工工事開始から営業運転開始までの期間)と、着工時期との関係を図1に示す。

太平洋側に設置された福島第二・2号機では57箇月、また日本海側に設置される柏崎刈羽・5号機では60箇月で建設を行っている。この建設工期は、電気出力1,100 MW級BWR(沸騰水型原子炉)プラントの初号機である日本原子力発電株式会社東海第二発電所の建設実績62.9箇月に比較して短縮されており、続いて今後建設される浜岡・4号機、柏崎刈羽・4号機～7号機では、更に建設工期の短縮が予定されている。これらは、経済性を考慮した革新的な建設技術の開発適用により実現するものである。

以下に、最近の建設技術の進捗に関して代表的な具体例を述べる。

2 建設工法、工事管理の技術開発の推移

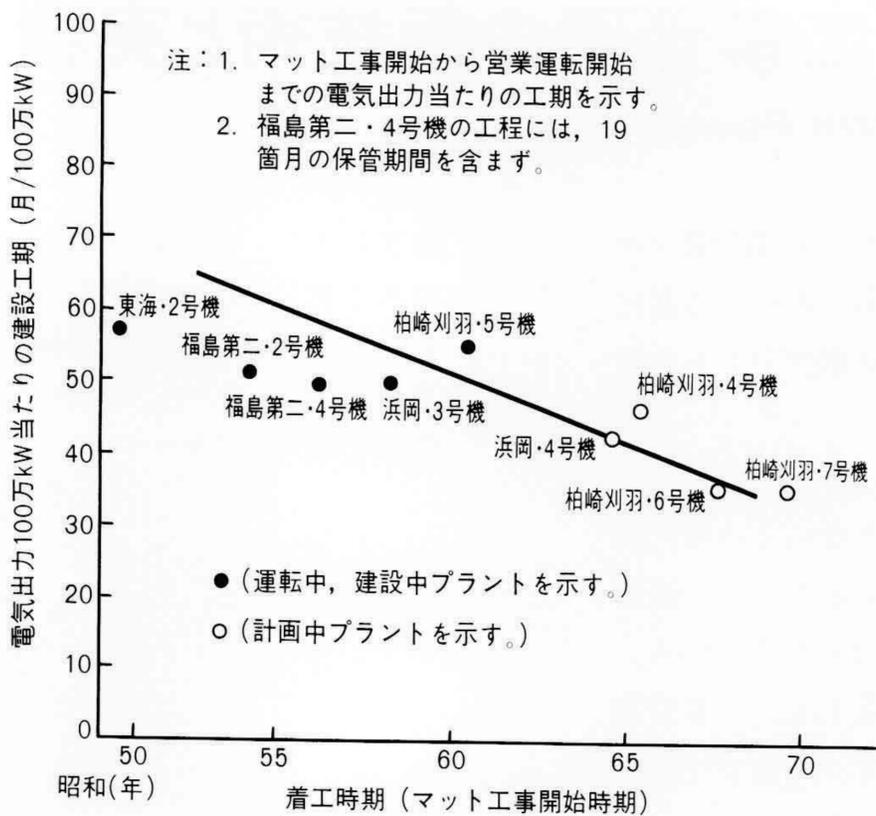
2.1 プラント建設の高度化の着目点

BWRプラントの建設では、一般的には原子炉設備の建設が全体建設工程のクリティカルパスとなる。図2に、福島第二・2号機での原子炉建屋の主要工事についてその実績工程を示す。

建築工事と、機械、電気計装及び各種の試験などの作業が並行して進められていることが分かる。すなわち、建設工程は、建設の前半では建築会社の行う建築工事の工程と、またRPV(原子炉圧力容器)の第一次水圧試験以降では、系統試験工程などと密接な関係を持っている。

したがって、プラント建設の信頼性向上を図り、経済性を考慮した工期短縮、いわゆる高度化を図るためには、単に機械側だけの工期短縮の技術開発にとどまらず、建築会社及び電力会社などの理解と協力を得ながら、下記の項目に着目し

* 日立製作所日立工場 ** 日立プラント建設株式会社



注：略語説明

- 東海・2号機(日本原子力発電株式会社第二発電所, 出力1,100 MW, MARK-II PCV)
 - 福島第二・2号機(東京電力株式会社福島第二原子力発電所第2号機, 出力1,100 MW, MARK-II改PCV)
 - 福島第二・4号機(東京電力株式会社福島第二原子力発電所第4号機, 出力1,100 MW, MARK-II改PCV)
 - 浜岡・3号機(中部電力株式会社浜岡原子力発電所第3号機, 出力1,100 MW, MARK-I改PCV)
 - 柏崎刈羽・5号機(東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所第5号機, 出力1,100 MW, MARK-II改PCV)
 - 柏崎刈羽・4号機(東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所第4号機, 出力1,100 MW, MARK-II改PCV)
 - 浜岡・4号機(中部電力株式会社浜岡原子力発電所第4号機, 出力1,137 MW, MARK-I改PCV)
 - 柏崎刈羽・6号機(東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所第6号機, 出力1,356 MW, 改良型BWRプラント)
 - 柏崎刈羽・7号機(東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所第7号機, 出力1,356 MW, 改良型BWRプラント)
- 出力(電気出力)
MARK-I改PCV(MARK-Iタイプ改良型原子炉格納容器)
MARK-II PCV(MARK-IIタイプ原子炉格納容器)
MARK-II改PCV(MARK-IIタイプ改良型原子炉格納容器)

図1 最近の沸騰水型原子力発電プラントの建設状況と電気出力当たり建設工期の推移 建設工期短縮のニーズが増していることが分かる。

た技術開発を行うことが肝要である。

- (1) 現地建設の生産性の向上
- (2) 現地作業量の削減
- (3) 建築工事と機械工事の並行作業の拡大
- (4) 工事管理手法の改善

2.2 建設技術開発の推移

BWRプラント建設の初期段階では、主に欧米での建設手法を習得することで実施した。その後の通商産業省の指導による軽水炉改良標準化計画及び高度化計画に沿って、種々の建設技術の開発及び改善を、電力会社の協力のもとに実施してきた。現地では、質量で数キログラムの製品から約720 tのRPVのような超重量品に至るまで、約5万個の機器の輸送、搬入

実績工期 (箇月)	マット工事開始	PCV 着工	PCV-L/T完	RPV 取り付け	第一次水圧試験	燃料装荷	運開
	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▽
	5.0	11.0	14.6	8.5	7.8	10.1	(合計 57.0)
建築工事	マット		生体遮へい壁ほか				
機械工事		PCV		機器・配管・ダクト			
電気計装工事			盤・トレイ・ケーブル・計装				
試験				単体試験, 系統試験			起動試験

注：略語説明 PCV(原子炉格納容器)
PCV L/T(原子炉格納容器耐圧漏洩試験)

図2 福島第二・2号機原子炉設備の建設工程 工程短縮を図るためには、建築工事との協調も必要であることが分かる。

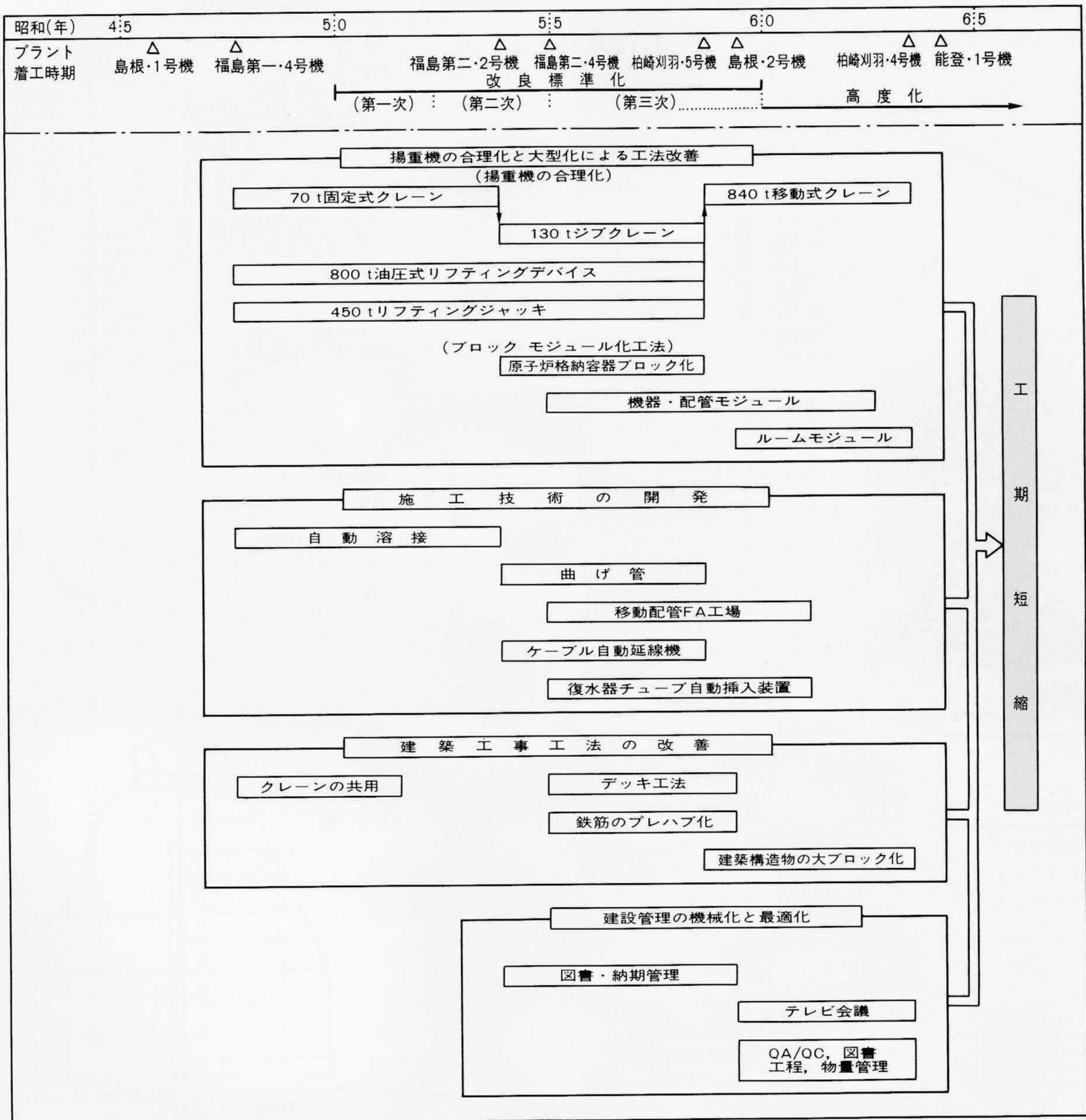
及び据付けを必要とする。更に、配管の据付けのため、約3万箇所の配管溶接が必要となる。また電気工事では、長さ約2,000 kmのケーブル布設が必要となる。これらの現地建設の高度化を図るため、種々の新しい建設技術の開発と適用が進められてきている。図3に、プラント建設の高度化の着目点に沿って、揚重機の合理化と大型化による工法改善、施工技術の開発、建築工事工法の改善及び建設管理の機械化と最適化の4項目について、新技術の開発時期と、その適用プラントを体系的に示す。

3 揚重機の合理化と大型化による工法改善

3.1 揚重機の合理化

敷地の狭い現地の場合は、福島第二・2号機で開発した作業半径50 mで130 tのつり上げ容量の固定式ジブクレーンで、PCV(原子炉格納容器)及び一般機器の搬入、据付けを行っている。更に、発電機固定子(質量約400 t)の搬入のため、450 tリフティング ジャッキを開発し、RPVには800 tの油圧式リフティング デバイスを開発してきた。また、敷地の広い現地の場合は、建屋周辺を移動することで、すべての建屋への機器のつり込み搬入が可能となる移動式クレーンが効果的であり、大型移動式クレーン(以下、大型C/Cと略称、最大つり上げ容量は840 t, RPVつり込み時の作業半径54 mでの定格つり上げ容量は750 t, 定格つり上げ容量100 tでの最大作業半径は130 m)の採用が可能となる。

大型C/Cの採用が可能な場合は、本クレーンによってRPV及び発電機固定子の搬入が可能となり、従来、仮設揚重機と



注：略語説明 FA(Factory Automation), QA/QC(Quality Assurance/Quality Control)
 能登・1号機(北陸電力株式会社能登原子力発電所1号機, 出力540 MW, MARK-I改PCV)

図3 主要な建設技術開発及びその適用の変遷 年々新技术及び工法の開発とその適用に努めていることが分かる。

して準備した, RPVリフティング デバイス及び発電機固定子用ジャッキアップ装置が不要となり, 3種の大型仮設揚重機を1種に集約化することが可能となる。

図4に大型C/Cによる柏崎刈羽・5号機のRPVのつり込み搬入状況を示す。800 t油圧式リフティング デバイスによるRPVつり込み搬入の場合には, 原子炉建屋の運転床の完成後に荷重の一部を建屋から支持し, しかも建屋工事の一時中断を必要としたが, 大型C/Cの場合には建屋工事の進捗とは無関係となり, 建屋工事の中断も数日にとどめることができた。

また, 発電機固定子の搬入据付けも, 従来は, タービン建屋の外壁に仮開口部を設置し, 450 tリフティング ジャッキで運転床階までつり上げ, ころ引きにより建屋内に搬入し据え付けていた。柏崎刈羽・5号機では, 大型C/Cでタービン建屋の屋根設置直前に, 発電機固定子をつり上げて直接ベース上

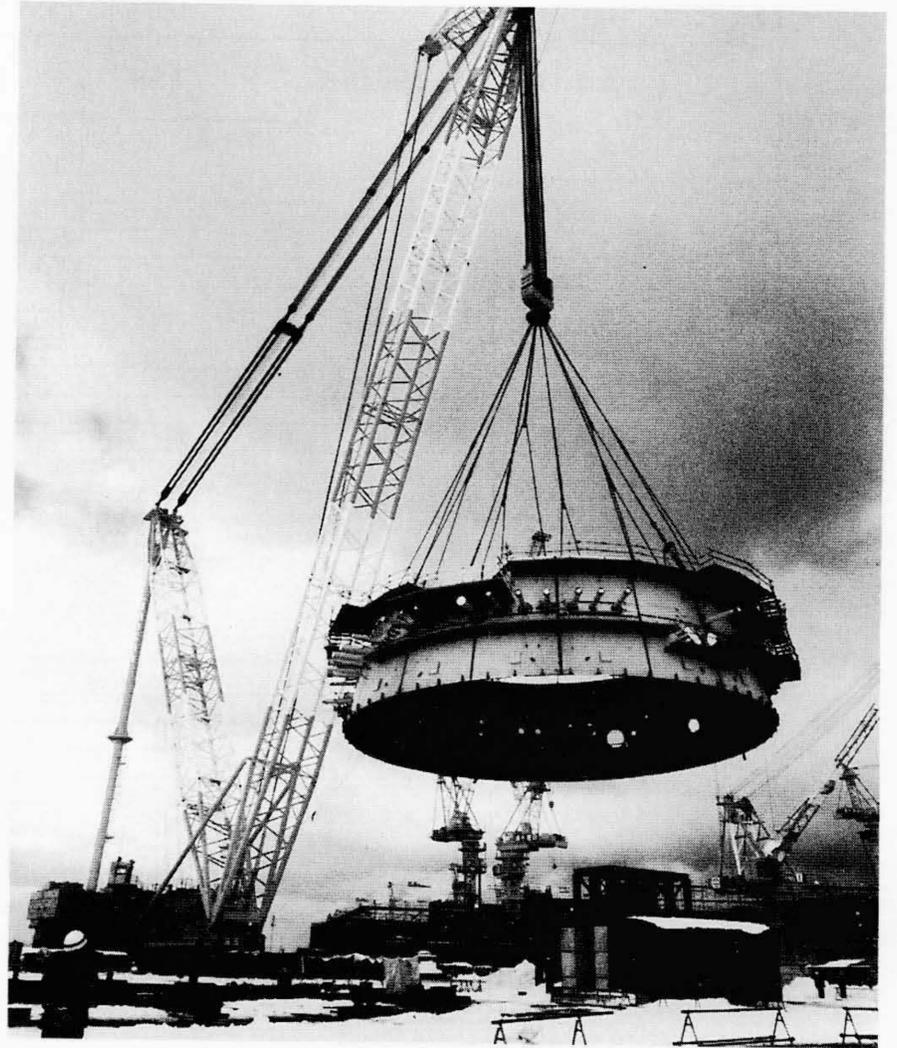
に設定し, 1日で搬入・据付け作業を完了することができた。

本大型C/Cは, 前後2箇所にキャタピラを持つクローラにより移動, 旋回するもので, クレーンの安定性が高い。現時点では, 作業半径30 mで840 tの世界最大級のつり上げ容量を持つだけでなく, 製品をつり上げた状態で移動できる国内唯一のクレーンである。

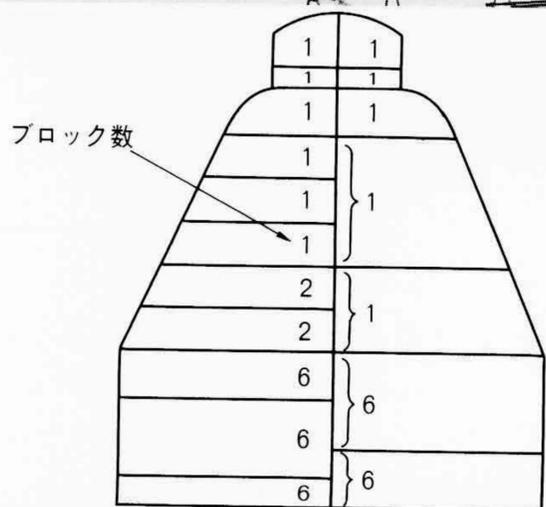
本クレーンにより, 従来は機械工事では, 最大130 t, 建築工事では10 tまでの製品のブロック モジュール化を行っていたが, 全建屋の製品を100 t以上に大型化したブロック モジュール化工法の適用が可能となる。

3.2 ブロック モジュール化工法

現地の各建屋内での作業をできるだけ少なくするため, 機器, 配管類を工場又は現地の構内で大ブロックに組み立て, 加工し, 所定の位置に搬入し, 据え付ける, いわゆるブロッ



適用プラント	福島第二・2号機 福島第二・4号機 島根・2号機	柏崎刈羽・5号機
対象製品・用途		
原子炉格納容器大型ブロック材, その他一般機器・配管・バルブのつり込み用	130 t大型ジブクレーン (ブロック化, モジュール化)	
発電機固定子つり込み専用	450 tリフティングジャッキ (リフティング装置の仮設・撤去が必要)	840 t大型移動式クレーンに集約 (作業半径54 mで750 tのつり上げ能力)
原子炉圧力容器つり込み専用	800 t油圧式リフティングデバイス (原子炉建屋建設を中断し, リフティング架台の仮設・撤去が必要)	



	福島第二・4号機	柏崎刈羽・5号機
クレーンつり上げ容量	130 t	840 t
ブロック数	28	17
建設工期	11箇月	7.5箇月

図4 柏崎刈羽・5号機での840 t移動式クレーンの活用状況
最大質量製品である原子炉圧力容器(質量約720 t)は, 建築工事進ちょくとかかわりなく, また建築工事との干渉もなく, 昭和62年10月2日に, 所定の位置につり込み据付けを完了した。

図5 原子炉格納容器のブロック化状況 柏崎刈羽・5号機では, 840 t移動式クレーンによって, 地上で17ブロックに組み立て, 所定の位置に搬入し, 7.5箇月の工期で組立てを完了した。

ク モジュール化工法を採用することが効果的である。

ブロック モジュール化工法を採用するに当たっては, 現地の揚重機の容量, 輸送寸法及び建屋内の開口部寸法などの適正化の配慮が必要である。この工法の適用拡大を図るためにも前記のように, つり上げ容量の大きい, 安全性の優れた揚重機の採用を推進してきた。

図5に, 柏崎刈羽・5号機でのPCVのブロック化工法の一例を示す。130 tジブクレーン使用の場合, 28ブロックに地上で組み立て搬入したが, 大型C/Cを用いることによって, 17ブロックと更に大型にブロック化して組み立て搬入した。これ

により, 建屋内での作業量が大幅に少なくなり, しかも工期もMARK-IIタイプ改良型原子炉格納容器では, 国内最短の7.5箇月に短縮することができた。更に, PCVだけでなく, RPVの鋼製ペディスタル及びダイアフラムフロアなども, 200~400 tの重量の大型ブロックに組み立てて搬入し, 据付けを行った。

図6に, 島根・2号機のタービン建屋内の配管モジュールの一例を示す。配管, 弁, サポート及び操作架台などを工場でモジュールに組み立てて, 現地に搬入して据え付けた。更に, 大型C/Cの採用に伴って, 130 t程度の配管モジュールを柏崎刈羽・5号機では104基製作中であり, 同じく4号機では

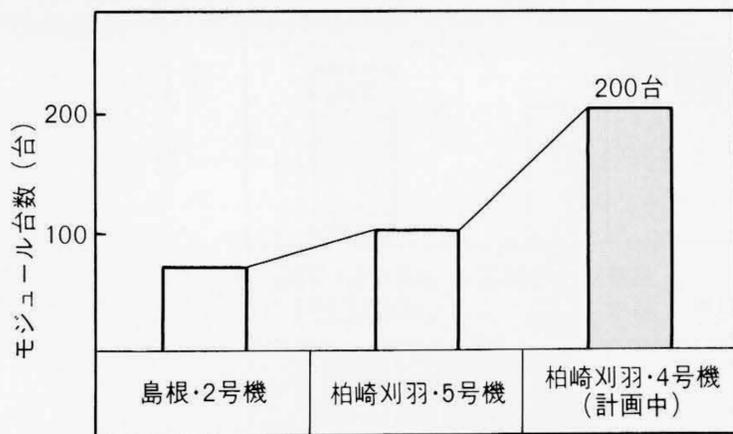
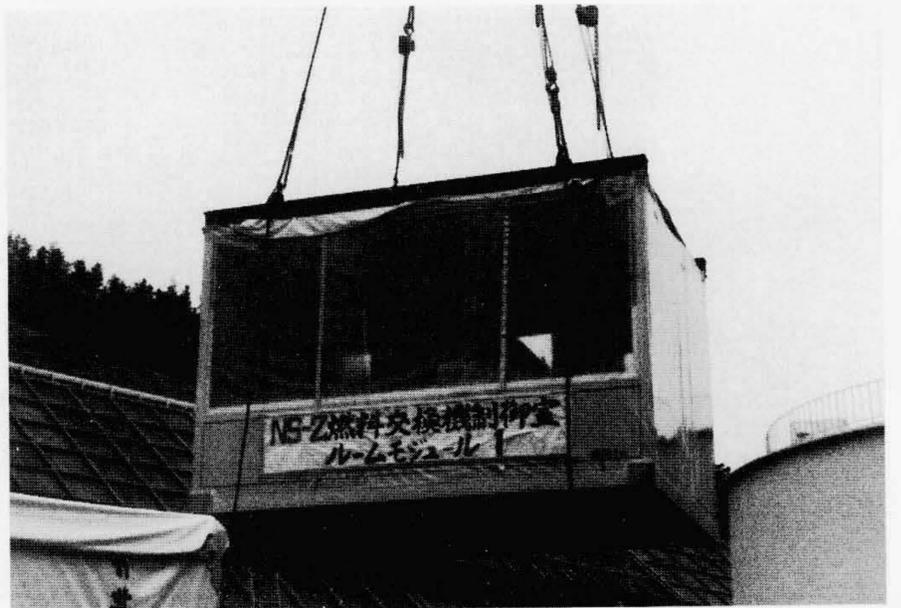
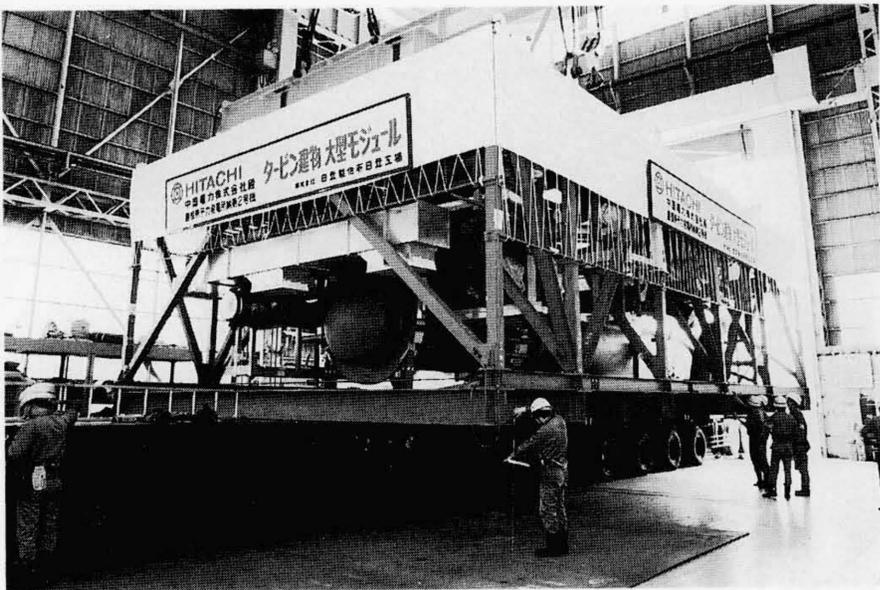


図6 島根・2号機タービン建屋内配管モジュールの実施例

配管、弁サポート、架台などを工場でモジュールに組み立て、加工し、据え付けることで現地の作業量の削減を図った(質量90t, 幅15m, 奥行き9m, 高さ5m)。また、今後のプラントでは、その適用の拡大を図る予定である。

約2倍の200基の配管モジュールの適用を図る予定である。

図7に、島根・2号機の燃料交換機制御室のルームモジュール化工法の実施例を示す。原子炉建屋の運転階に設置される制御室は、電気工事が工程的にクリティカルパスとなる。そのため、建屋(軀)体構造体と制御盤、ケーブル、HVAC(換気空調)ダクトなどを一体に組み立てたルームモジュール化工法を開発し採用した。同様に、計算機室、電気室もルームモジュール化し工期短縮にこたえた。この実績に基づいて、次期プラントでは約400tの中央制御室の建屋構造体と、HVACダクトなどを一体に組み立てて搬入、設定する大型ルームモジュール化工法の採用ができる見通しを得た。これにより建築工事と機械工事のいっそうの並行作業の拡大が図られる見込みである。

4 施工技術の開発

現地では、各建屋内での一般機器、配管工事のため膨大な作業が施工される。そのため、種々の技術開発及び工法改善を図っている。

配管については、3次元CAD(Computer Aided Design)と連動した自動加工設備の開発を行っている。図8に、大径管用高周波曲げ装置及び移動式小径管曲げ自動ワークショップを示す。これらの設備による曲げ管の適用率も、同図中に示すように年々増大している。本設備の適用拡大を図ることによって、配管施工の信頼性の向上を図っている。

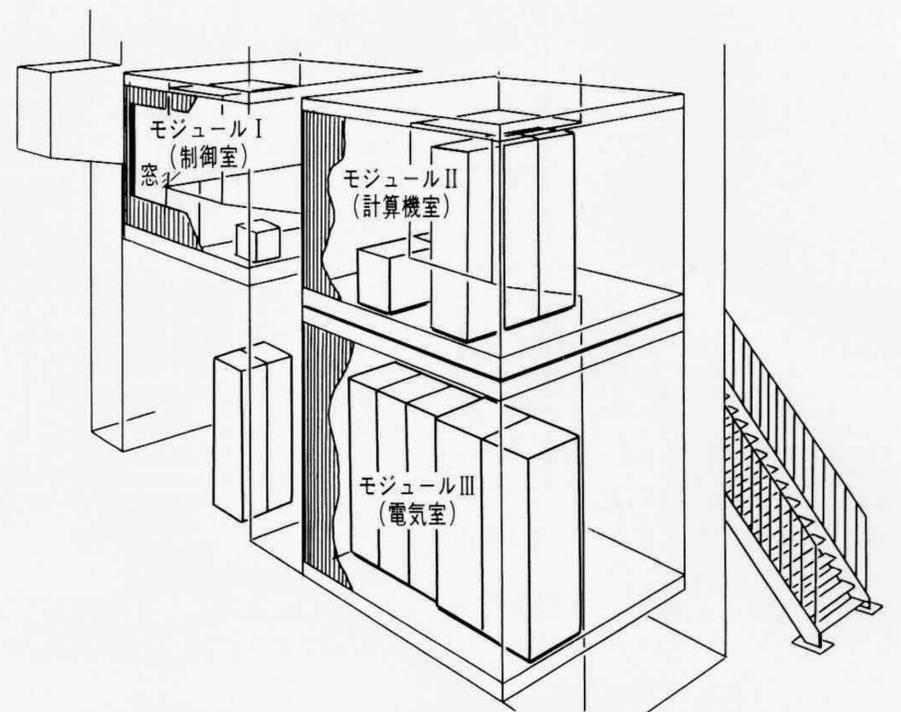
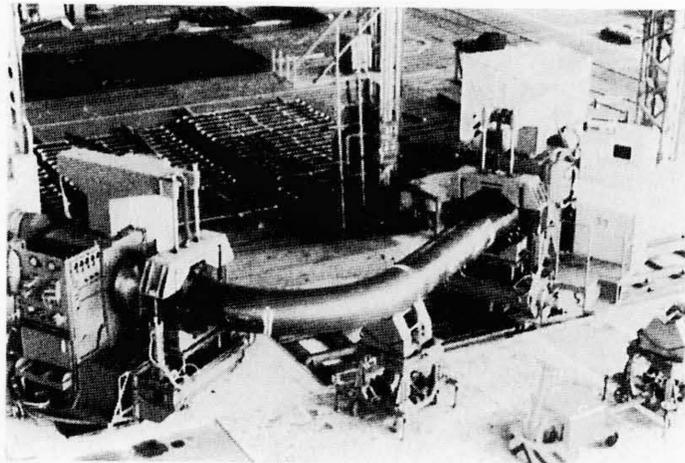


図7 島根・2号機燃料交換機制御室のルームモジュール化工法の一例 建設工程上、短期間で完成を必要とする部分では、建屋と機械とを一体にプレハブ化するルームモジュール化工法が有効である(質量15t, 幅4.5m, 奥行き3.1m, 高さ2.9m, 制御盤・ケーブル・空調ダクトなどを内蔵)。

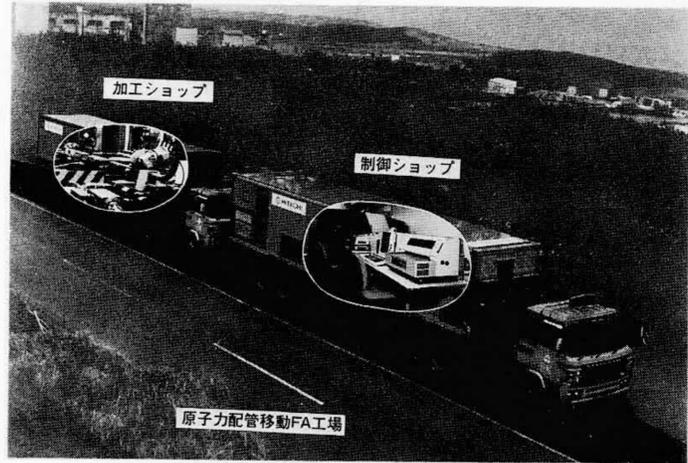
配管の現地での組立てでも、図9に示すように大口径配管の自動溶接の適用拡大を図っている。また、小口径配管についても、自動ティグ溶接機の適用拡大を図っている。更に、配管溶接の自動化に加え、現地での鋼構造物の溶接の自動化、現地加工設備の充実を図っている。

電気工事でも、特に多くの作業量を必要とするケーブル延線工事の作業効率向上を図るため、事前の計画に基づいてケーブルを所定の長さに切断して延線するドラムレス延線工法、及びケーブル自動延線機²⁾を開発して、福島第二・2号機以降のプラント建設に適用している。

また、タービンの復水器には、数万本のチューブが組み込まれるが、従来、このチューブ挿入作業は、据付け現場近くの作業場所で多くの熟練した作業員によって行われていた。図10に復水器チューブ自動挿入装置を示す。自動的にチューブの挿入位置を検出し、自動的にチューブの挿入ができる。本装置を浜岡・3号機以降のプラント建設に適用し、好結果を得ることができた。



大径管用高周波曲げ装置
(適用プラント 福島第二・2号機以降)



移動式小径管冷間曲げワークショップ
(適用プラント 浜岡・3号機以降)

曲げ管採用拡大の推移

大径管 (≥65A)	高周波曲げ管適用率 (%)	100				
		50				
			福島第二・2号機	浜岡・3号機 福島第二・4号機	柏崎刈羽・5号機 島根・2号機	柏崎刈羽・4号機 以降(計画中)
小径管 (<50A)	冷間曲げ管適用率 (%)	100				
		50				95%

$$\text{曲げ管適用率} = \frac{\text{曲げ管使用員数}}{\text{全曲げ部員数}} \times 100(\%)$$

図8 大径管用高周波曲げ装置及び移動式小径管曲げ自動ワークショップ 電子計算機による設計(CAD: Computer Aided Design)情報により,自動的に大径管は工場で,小径管は現地で曲げ加工を行っている。

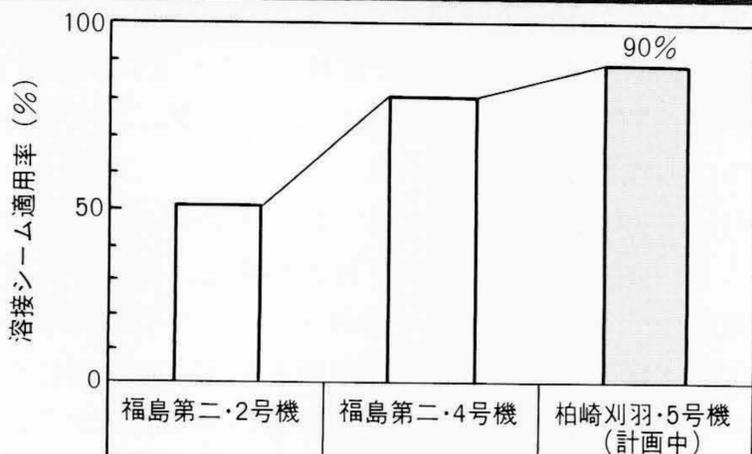
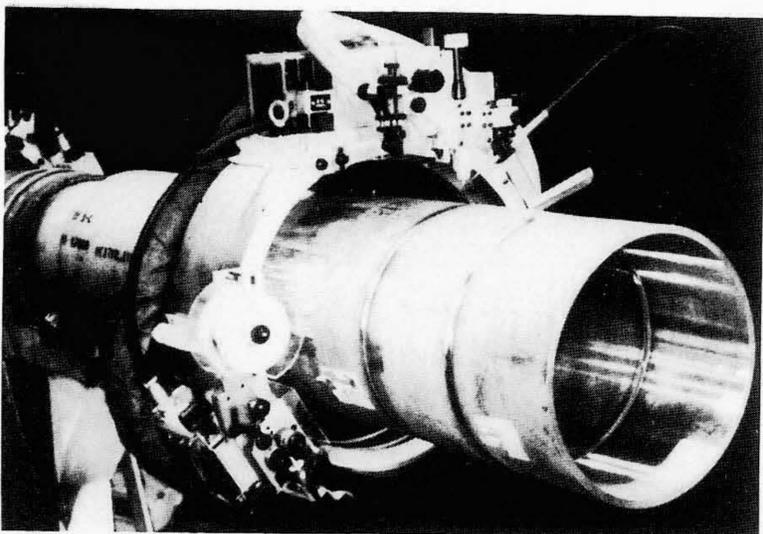


図9 大口径配管の自動溶接状況 現地での配管の自動溶接は,年々その適用率の拡大が図られている。

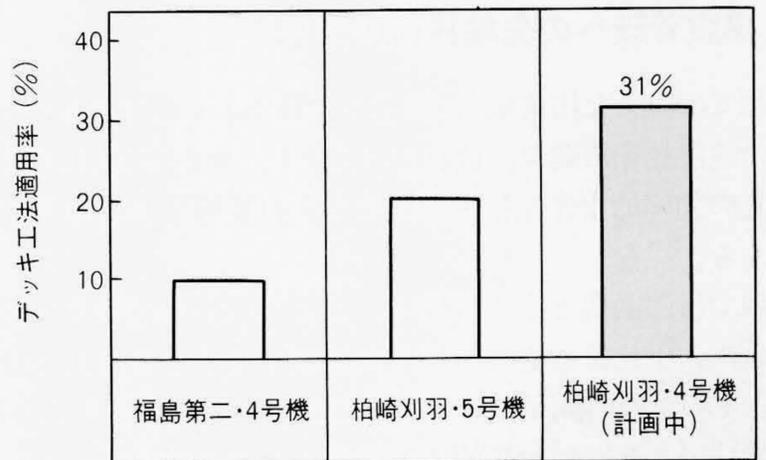
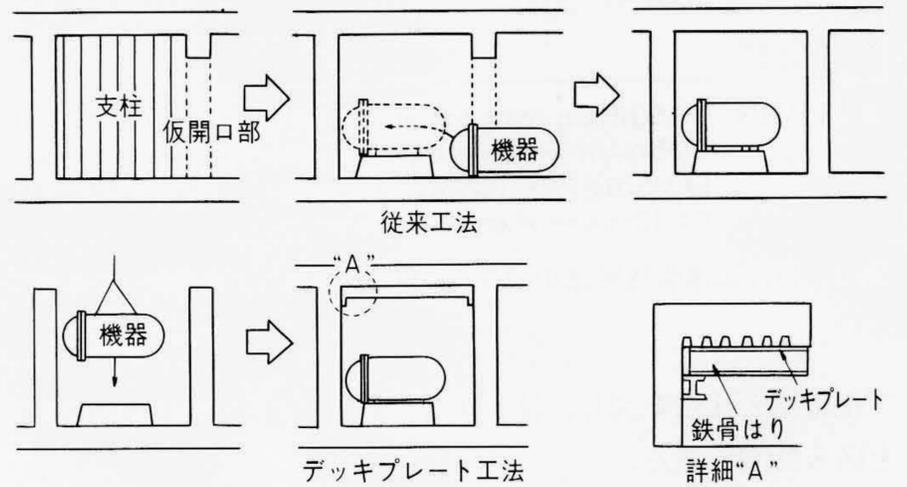
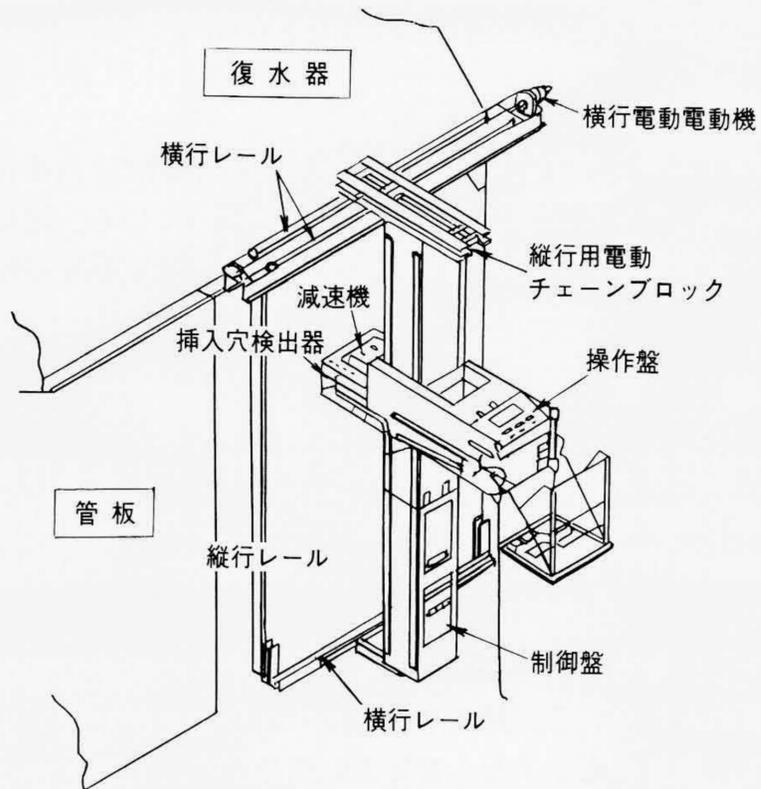
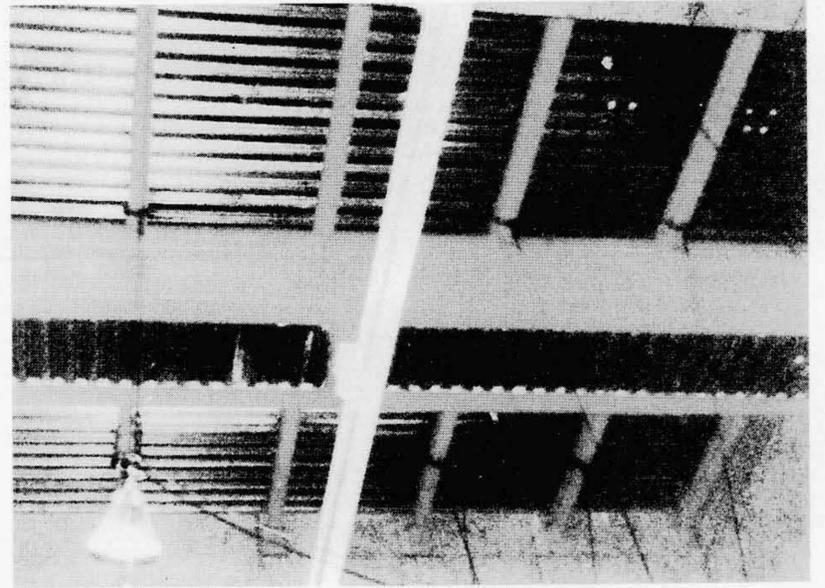
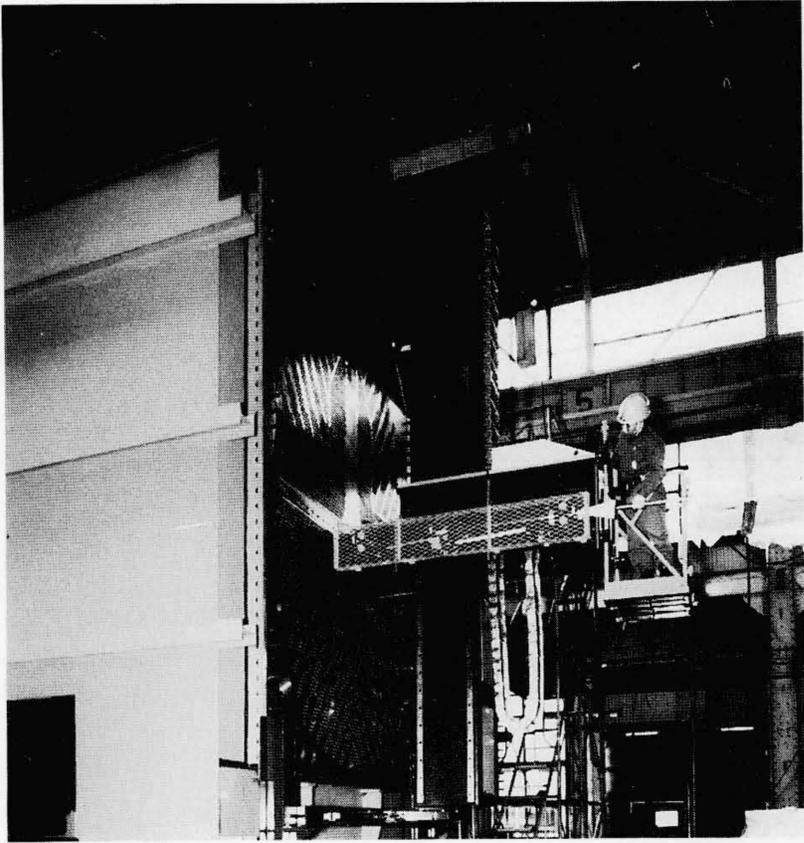
5 建築工事工法の改善

建設の前半では,建屋工事と並行して機械工事が行われる。そのため,建築工事と機械工事の並行作業の拡大によって工期短縮を図るため,建築工事との協調を図っている。

図11にデッキ工法の実施例を示す。天井部の床スラブの設置前に機器の搬入を行い,その後に鉄骨はり(梁)とデッキプレートを設置して,コンクリート工事を行う。コンクリート工事と並行して機械工事に着手できる。本工法によって,3箇月程度の機械工事の前倒し着工ができる。

更に,このデッキ工法の改善を図るため,柏崎刈羽・5号機では,鉄骨はり(梁)とデッキプレートを地上で組み立て,しかも配管などと一体にして組み立て搬入設定した。これによって,次期プラントでは鉄骨はりを建屋構造強度部材として設計し,大型C/Cを利用した,建屋床構造部材と配管などを一体にモジュール化する配管・床構造部材複合モジュール化工法の採用が可能であることが確認された。

建築工事でも,機械工事との錯そうを少なくするため,種々の改善検討が進められている。図12に,柏崎刈羽・5号機でのタービンペデスタルはり部の鉄筋プレハブ化の一例を示す。計画中プラントでは,建築側の原子炉建屋マツ鉄筋と機械側のRPVペデスタルアンカーボルトなどを一体としたプレハ



$$\text{デッキ工法適用率} = \frac{\text{デッキ工法適用床面積}}{\text{建屋延べ床面積}} \times 100(\%)$$

図10 タービンの復水器チューブ自動挿入装置 数万本のチューブの挿入組立て作業を、自動的に位置の検出及び挿入作業を行うことによって、作業期間の短縮を図っている。

図11 デッキ工法の実施例 建屋天井部の建築工事の施工前に、機器の搬入・据付けができ、建築工事との並行作業が可能となり、年々、その適用拡大を図っている。

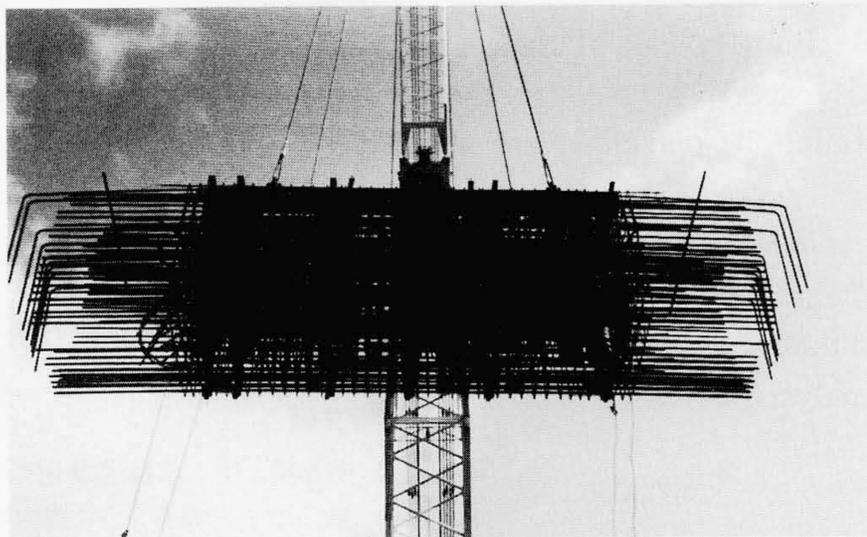


図12 柏崎刈羽・5号機タービンペDESTALはり部の鉄筋プレハブ化の一例 直径38mmの鉄筋を一本一本手作業で配筋していたが、鉄筋を加工し一体にプレハブ化してつり込み、所定の位置に設定して工期の短縮を図っている(質量約35t)。

昭和(年)	50	55	60	65	備考
階別工事管理 (帳票管理)	福島第一・4号機, 東海・2号機ほか				
エリア別工事管理 (電子計算機による管理)	NICS, BPMS 福島第二・2号機及び4号機				●図書, 製品, 納期管理 ●工事進捗管理, 工数管理
	CARAVAN/NICS, BPMS 浜岡・3号機, 島根・2号機, 柏崎刈羽・5号機				上記管理強化に加え ●QA, QC管理 ●物量, 工事管理 ●懸案事項, 保安管理
	建設CIM 柏崎刈羽・4号機以降				上記管理強化に加え ●工程計画, 据付管理及び据付けシミュレーション

注：略語説明 NICS(Nuclear power plant Installation information Control System)
 CARAVAN(Communication, Authorization, Reporting and Variance Analysis for Nuclear project control)
 BPMS(Big Project Management System)
 CIM(Computer Integrated Manufacturing)

図13 建設工事管理手法の改善 電子計算機の工事管理への適用拡大により、建設工事の最適化が図られていることが分かる。

ブ化工法の採用を図り、建設工程のクリティカルパスの回避を図る計画である。

6 建設管理への先端技術の活用

現地での膨大な作業量を、安全かつ効率よく消化するため、前述の建設技術の開発、改良だけでなく、約2,500人にも及ぶ作業員の効率的な作業推進を図るための管理手法の改善も必要となる。

現地では、必要とする時期に、必要な工事用図書及び製品を的確に入手し、所定の工期内に建設を完了しなければならない。そのための種々の管理手法の改善が図られてきている。

図13に、これらの代表的管理手法の改善の推移を示す。従来は、建屋の各階ごとに帳票による手作業で工事用図書、製品納期、工事進捗の管理を行っていた。最近では、各階で細分化した管理エリアを設定し、各エリアごとの管理を行うエリア別工事管理手法を採用している。

エリア別に、工事用図書、製品納期及び工事進捗の管理を電子計算機で行う管理システムとして、当初は製品・図書の総合納期調整を主機能とするBPMS(Big Project Management System)、工事進捗、製品資材、工数管理を主機能とするNICS(Nuclear power plant Installation Control System)を開発し運用してきたが、昭和50年後半からNICSの各機能と、工場とのネットワーク機能を強化し、新たにQA/QC(Quality Assurance/Quality Control)、工事完成高、保安管理などを加えたCARAVAN/NICS(Communication, Authorization, Reporting and Variance Analysis)を開発し、プラント建設に適用してきている。更に、計画中プラントでは、工程計画、据付シミュレーションなどのシステムの開発を行い、これらのシステムを統合してCIM(Computer Integrated Manufacturing)として適用を図り、現地建設の効率的かつ円滑な推進を図る予定である。

また、工場と現地間の技術情報伝達の早期化と円滑化を図るため、テレビ会議システムの導入を図っている。特に、島根・2号機などの遠隔地に対しては、大きな成果を挙げている。

7 結 言

原子力プラントの建設工法及び工事管理にかかわる代表的新技術、並びに新工法について紹介した。これらの新技術、新工法を適用することによって、工期短縮のニーズに対応してきた。

しかし、最近、種々の要因から、いっそうの建設工期の短縮が求められている。計画中の浜岡・4号機及び能登・1号機では、岩盤検査完了から営業運転開始までの工程を各々48箇月以下とすること、柏崎刈羽・4号機では、同5号機の60箇月工程に比べて、大幅に短縮した52.5箇月工程、また同6号機及び7号機では、更に短縮した48箇月工程とする検討が進められている。日立製作所では、本稿で述べた建設技術、工法のいっそうの改善と適用拡大を図ることで、各電力会社の工期短縮の計画に対応していきたいと考えている。

最後に、建設工法及び工事管理の新技術開発と、その適用具体化のために、御指導及び御協力をいただいた東京電力株式会社、中国電力株式会社、中部電力株式会社及び北陸電力株式会社の関係各位に対し、心から御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 内ヶ崎, 外: 改良標準化ベースプラント東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機の特徴, 日立評論, 66, 4, 255~260(昭59-4)
- 2) 朝岡, 外: ループ式ワイヤによるケーブル延線工法, 火力原子力発電, 37, 362, 1229~1234(昭61-11)