

原子力発電プラント建設工程の短縮及び管理

Shortening and Management of Construction Schedule for Nuclear Power Plants

我が国では現在までに23基の軽水炉型原子力発電プラントを完成させており、また、建設中のプラント数は昭和55年を底に第二の増大期を迎えている。原子力発電プラントは、代替エネルギー源早期開発の国家的要請、建設費低減などのために、建設工程短縮の必要性が高まっている。日立製作所では、早くから建設工法と管理の改善に努力を積み重ねてきた結果、最近の建設中プラントでは、新工法による機械、電気工事の先行据付けなどにより建設工程の短縮を実現し、また、プロジェクトの諸データの管理をコンピュータ化し、工程管理の精度を向上させている。今後の方向として、プレハブモジュール化の拡大や天候対策などの機械側工法の改善とともに、建築側との協同による建設工程の短縮を図っている。

江頭一晃* Kazuaki Etô
谷越敏彦** Toshihiko Tanikoshi
小川龍一*** Ryûichi Ogawa

1 緒言

石油高価格時代を迎えて、周知のように原子力が最有力の代替エネルギー源となり、この早期開発は国家的必要課題となっている。また、建設工程短縮による原子力の早期投入は、火力発電と原子力発電のコスト差による発電原価低減、数千億円に達する建設資金の利子低減効果など、大きなメリットを生ずるものと考えられる。国内の軽水炉型発電プラント建設中基数の推移を図1に示す。昭和53年以前をI期、その後をII期に分けると、現在はI期の山を終え、II期の山に入りつつあるところである。II期の建設物量は、建設中基数と1基当たり出力の増加及び単位出力当たり建設物量の増加(3章参照)を考慮すると、I期と比較して格段の増加が見込まれる。最近の経験では電気出力1,100MW級BWR(沸騰水型)原子力発電プラント1基当たりの建設人員のピークは機械工事(電気工事も含む。以下同様)関係で3千人近くに達しており、土木・建築関係をも含めたII期の建設人員は膨大なものになると推定される。一方、建設作業員の確保は現状でも問題になってきているが、今後の建設中プラント数の増加により、いっそうの困難が予想される。後述の工程短縮工法である機器・配管のモジュール化、建築工事と機械工事の併進化などによる現地作業量の低減、あるいは作業量ピークの低減はこの対策となるものである。

BWRプラントのPCV(原子炉格納容器)にはMark-I型とMark-II型があるが、最近の電気出力1,100MW級BWRプラントではMark-II型が最も多く建設されている。この型のプラントで日立製作所の建設経験は、日本原子力発電株式会社東海第二発電所(以下、東海-2という。)を完成し、更に、東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機(以下、福島2-2という。)及び同4号機(以下、福島2-4という。)を建設中である。東海-2は昭和48年5月31日に着工し、昭和53年11月28日に電気出力1,100MW級Mark-II型BWRプラントとしては、我が国はもちろん、世界最初に運開し、建設工程長62.9箇月(マッ工工事開始から運開まで)を記録した。これはMark-II型BWRプラントとしては、現在までのところ、最短記録である。福島2-2は通商産業省指導による改良標準化の成果を反映したMark-II改良型BWRプラントで、昭和54年2月28日

に着工、福島2-4は同じくMark-II改良型BWRプラントで昭和55年12月1日に着工し、昭和57年6月末現在、前者は81.8%、後者は27.7%の進捗度で共に順調に建設中である。

福島2-2、福島2-4などの新プラントの建設では東海-2

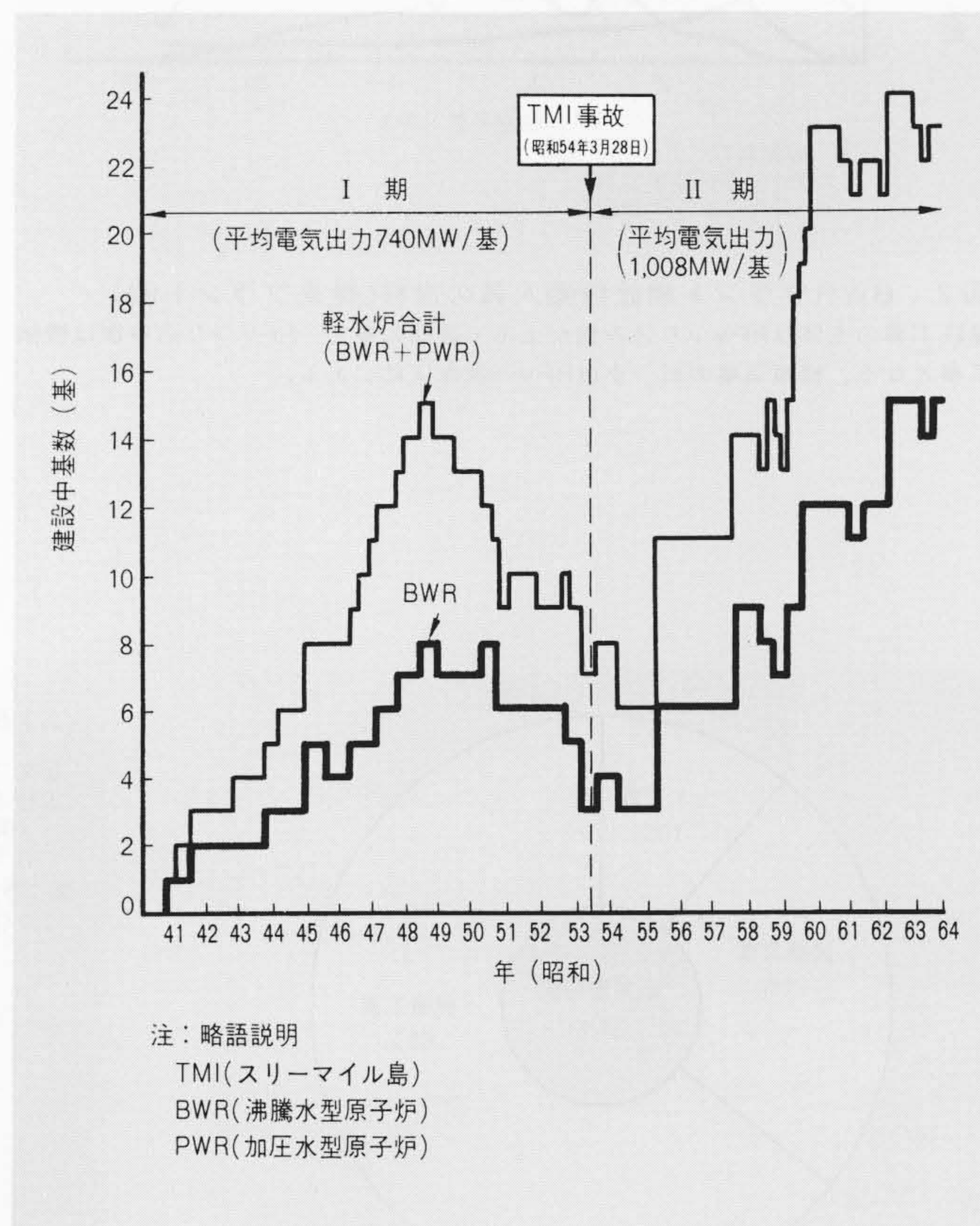


図1 国内軽水炉建設中基数の推移 II期の建設物量はI期に比べ、建設中基数、平均単基出力及び単位出力当たり建設物量がそれぞれ増加するため、大幅な増大が推定される(昭和57年以降は昭和57年度電力施設計画による)。

* 日立製作所原子力事業部 ** 日立製作所日立工場 *** 日立プラント建設株式会社

などの従来プラントに比べて、建設物量の増加にもかかわらず建設工程の短縮が計画され、その実績を挙げつつある。これは最近での建設工法と管理の改善に負うところが多い。以下、その主な例について機械関係を中心に記述し、更に、今後の進むべき方向を述べる。

2 建設工程短縮の着眼点

原子力発電プラントの建設工事は、大きく分けて土木工事、建築工事、機械工事の3種に分けることができる。この3種の工事の稼働人員及び労働時間構成のパターンを図2、3に示す。また、従来プラントと新プラントの対比で、工程長と工事進捗カーブを図4に、クリチカルパス工程と工法改善項目を図5に示す。これらから建設工程短縮の着眼点として下

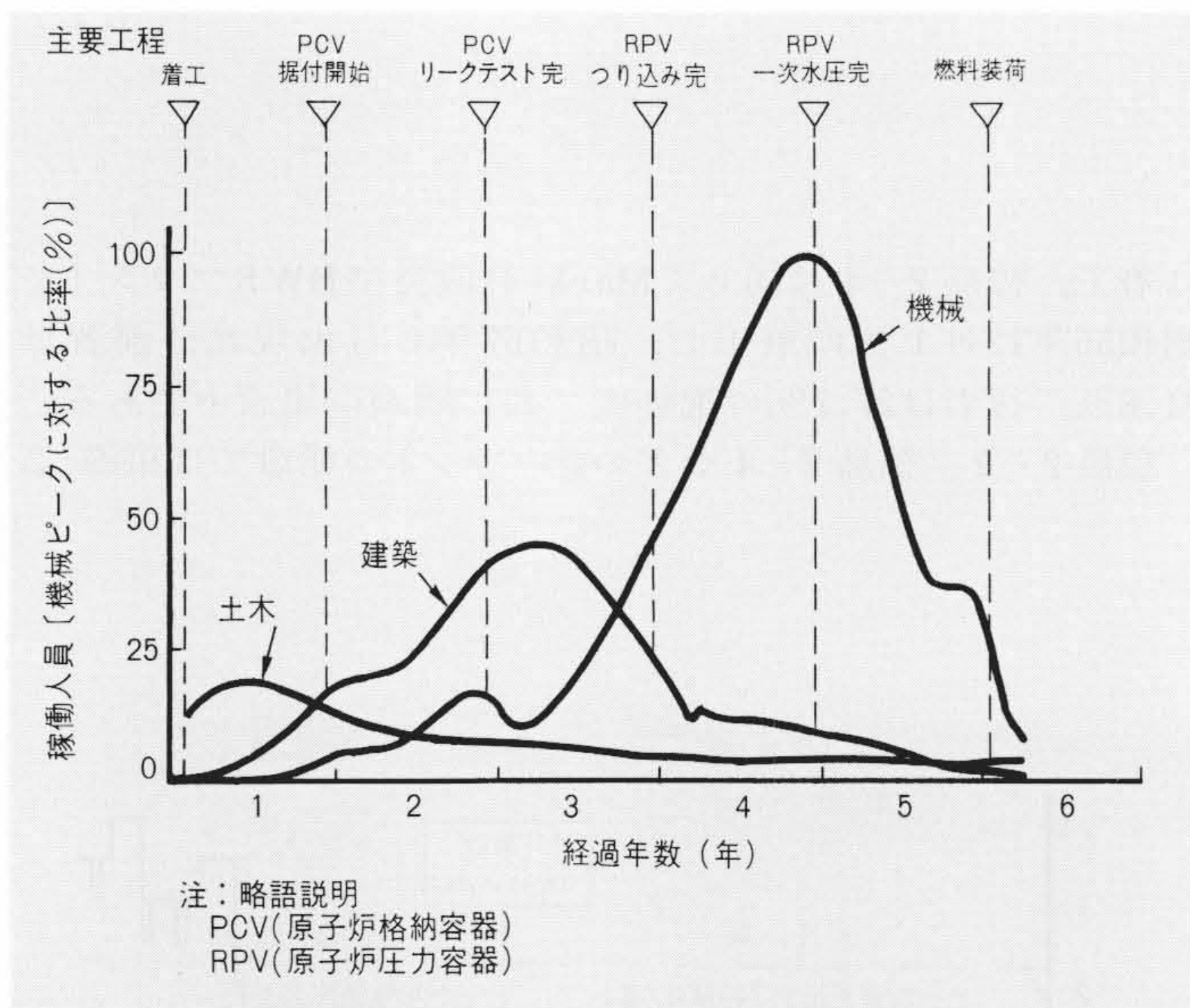


図2 BWRプラント建設稼働人員の推移(従来プラント例)
建設工事はRPVつり込み前が土木・建築工事、RPVつり込み後は機械工事となる。機械工事のピークはRPV一次水圧前にある。

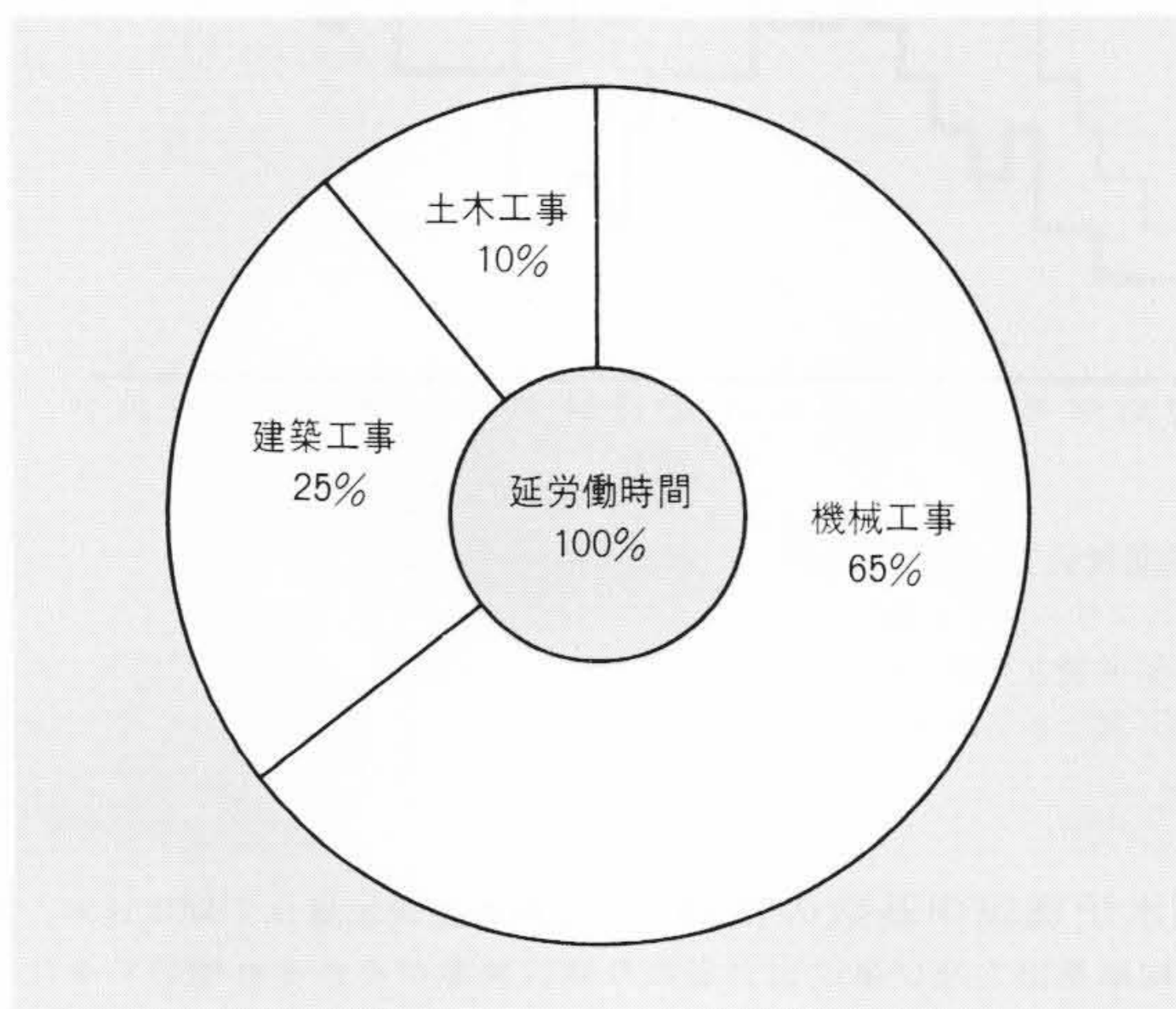


図3 BWRプラント建設延労働時間の構成(従来プラント例) 機械工事の延労働時間は全労働時間の過半を占め、かつ建設工事の後半に集中するため、現地作業量の低減とピーク平準化が重要である。

記を挙げることができる。

(1) 着工からPCV据付開始まで

機械工事としては、マット部など建屋への基礎ボルト、その他の埋設品工事などの程度で工事の主体は土木・建築側にある。機械側としては、建築工事への協力を通じて工程短縮を図っている。また、次の機械工事の準備として、機械工事に用いるタワークレーンの早期組立完了が大切な点である。

(2) PCV据付開始からPCVリークテスト完了まで

PCV据付工事がクリチカルパスである。PCV据付工事の作業量は、機械工事全体の中で約4%(従来プラントの例)と少ないにもかかわらずクリチカルパス期間が長く、他の併進工事も少ないので他からの制約が少なく、工法改善による工程短縮は比較的容易で、かつ全体工期短縮へ与える効果も大きい。

(3) PCVリークテスト完了からRPV(原子炉圧力容器)つり込み完了まで

建屋工事がクリチカルパスとなっている期間である。機械側としては、極力、建築工事との併進を図り、機器、配管、ケーブルトレイなどをプレハブ化したユニットを先に搬入し、機械工事を先行させて後続工程の機械工事量のピーク低減を図り、後続工程の工程短縮を可能とする努力が必要である。

(4) RPVつり込み完了からRPV一次水圧試験完了まで

建設工事の中で最大の作業量ピークであり、従来プラント例ではこの期間に全機械工事量の45%を消化している。更に、この期間の作業人員は作業人員密度の限界近くまで投入されており、これ以上の作業人員密度を増加しても工程短縮の効果は薄い。この期間の工程短縮のためには、天井クレーン稼働開始までの建築工事クリチカルパス短縮対策とともに、(3)項と同様に、機器・配管モジュール化などによる現地作業量低減策と、下部の部屋に機器・配管を入れたまま床スラブコンクリートを打設するデッキプレート工法、その他による建築工事との併進が重要な課題となる。

(5) RPV一次水圧試験完了から燃料装荷開始まで

この期間の工程短縮のためにはクリチカルパスである系統別機能試験の合理化が第一に考慮されねばならない。この期間で最も重要なことは、据付工事から系統別機能試験への円滑な引渡しである。このために、設計管理、工場製作及び

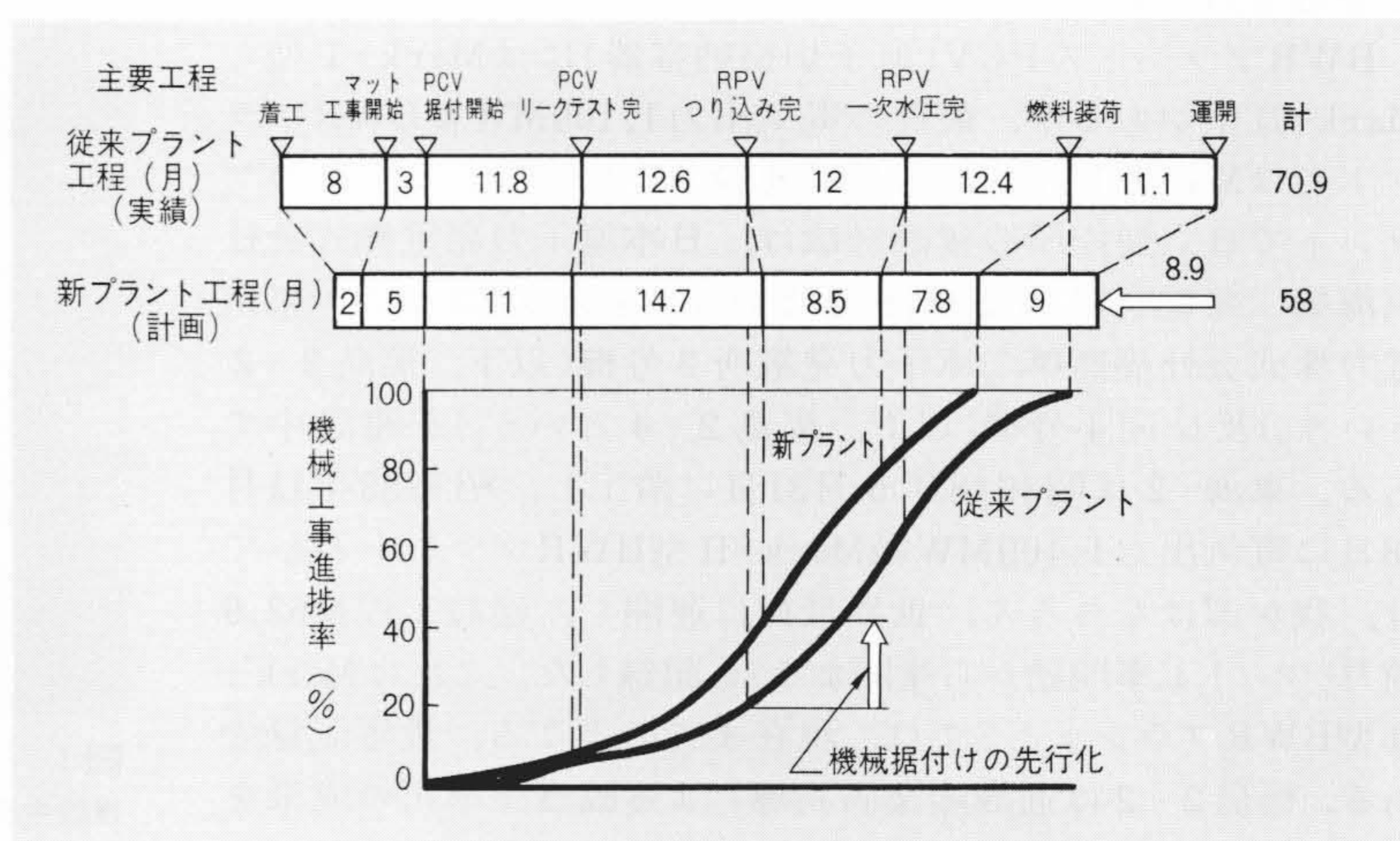


図4 BWRプラント建設工程長比較(電気出力1,100MW級, Mark-II型) 従来プラントではRPVつり込み以降に全工事量の80%強を消化していたが、新プラントではRPVつり込み時点での機械据付けの先行化を図り、後工程の短縮を容易にした。

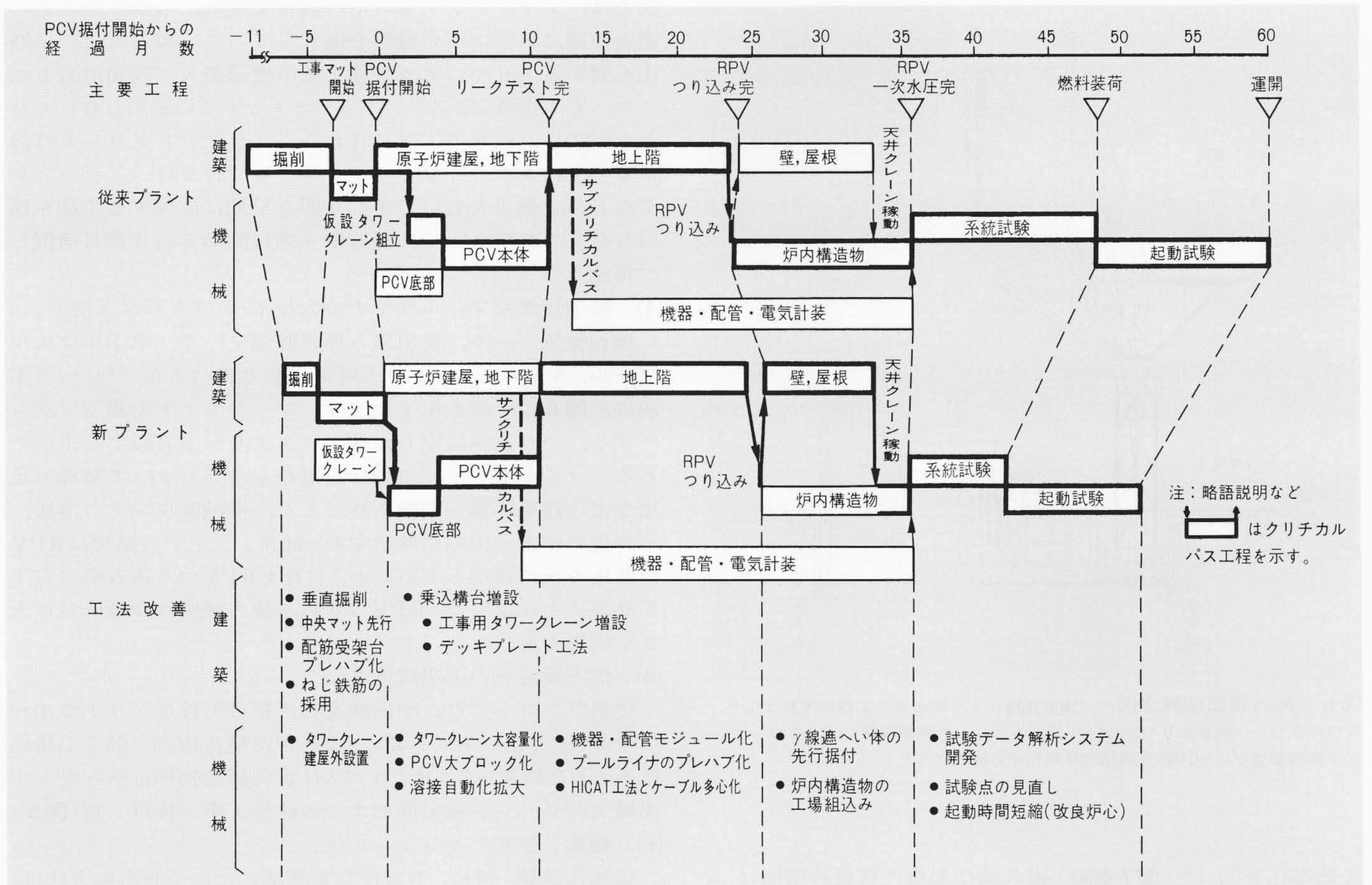


図5 建設工程クリチカルパスの比較 タワークレーンの稼働早期化と大容量化によるPCV工期短縮、機械工事の先行化によるRPV取り付け後工程の短縮、RPV取り付け後クリチカルパスの炉内構造物据付から建屋工事への移行などが注目される。

現地据付時でのQA管理、機械工事、電気計装工事、試験などを適切に一体化運営する確実な現地建設工程管理などを行なう必要がある。

(6) 全建設工事期間を通しての着眼点

機械工事全般を通して、工事の円滑な推進にとり最も重要なことは、据え付けられる機器を望ましい時点に現地へ搬入することができるように、製品納期管理を的確に行なうことである。このためには、計画設計、製品設計、製造、検査などの上流作業から製品の現地到着に至る全期間の総合管理システムの確立が必要である。

3 最近の建設工程の改善

前述のように、新プラントは従来プラントに比べて建設物量が増加している。例えば、機械関係ではPCV重量で約22%、配管重量で約40%、ケーブル長で約50%の増加、建築関係では原子炉建屋マット面積が34%、マット配筋段数が8段から18段と125%、原子炉建屋容量が32%の増加となっている。このような物量増にもかかわらず新プラントの建設工程は、図4に示すように、かなり顕著な短縮を計画し、その実績を挙げつつある。この工程短縮を可能としているものは、工法と管理の改善の積み重ねによる相乗効果と考えられるが、従来プラントと新プラントの工程の差で最も顕著なものは、機械工事の先行である。従来プラントでは、RPV取り付け時点で機械工事の進捗率は19%程度であったが、新プラントでは約42%にも達している。

4 最近の新建設工法

前述の建設工程短縮をもたらした工法改善の主要項目を図5に示す。このなかで主な例について以下に述べる。

(1) 垂直掘削工法によるPCV地上組立の早期開始

従来プラントでは、本館建屋の掘削の際、通常その法面に傾斜をもたせて掘削を行ない、掘削後に建屋地下壁の建築工事と埋め戻し作業を経て、はじめてPCV地上組立用定盤の設定スペースを確保する工法を採用していた。新プラントの一例では図6のように、鋼矢板などによって山止めし、垂直掘削を行なった。これにより、機械工事用タワークレーン組立エリア及びPCV地組みエリアが早期に確保でき、機械工事用タワークレーンの早期稼働とPCV地上組立の早期開始を可能とした。

(2) 機械工事用タワークレーンの建屋外設置と大容量化

従来工法では70t×30mのタワークレーンを原子炉建屋アウトボックス内に設置し、PCVやその他の機器の据付に使用していた。この工法では、タワークレーン組立開始がタワークレーン設置箇所までの建屋工事及び掘削埋め戻し作業完了後になり、タワークレーンの稼働開始が遅れる。新プラントでは、図6のようにタワークレーンを本館建屋外のヤードに設置し、建築工事との干渉をなくするとともに、前記の垂直掘削工法の採用によるタワークレーン組立エリアの早期確保との相乗効果によって、タワークレーンの稼働開始を大幅に早めることができた。また、このタワークレーンの能力を我が国で最初に130t×50mと巻上荷重、旋回半径共に大きくし、機器搬入

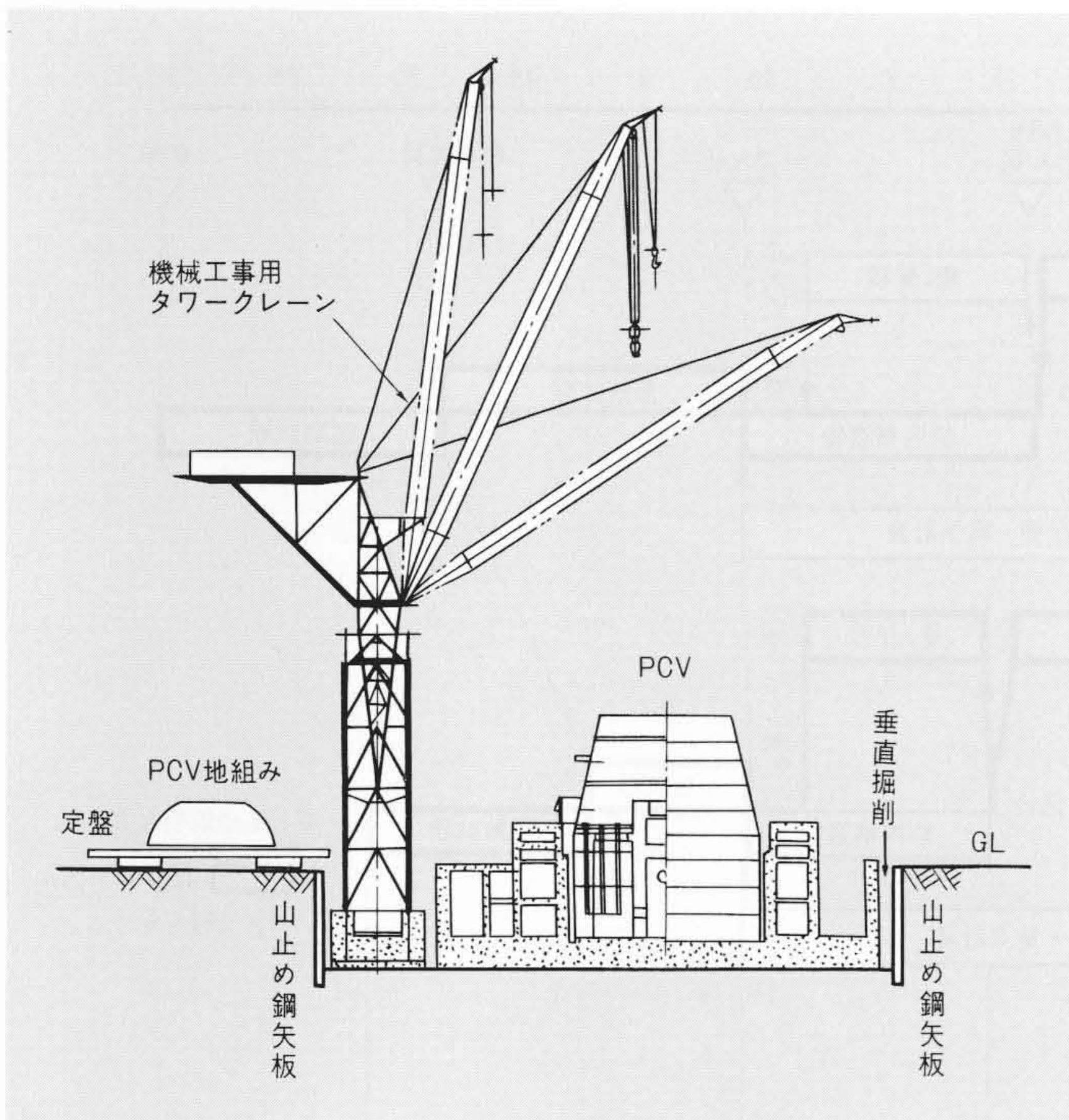


図6 PCV新工法概念図 垂直掘削により埋め戻し工程が不要となり、タワークレーン組立エリア及びPCV地組みエリアの早期確保によるタワークレーンの稼働並びにPCV組立開始の早期化が可能となった。

の効率化を図った(図7参照)。搬入用揚重機の容量の増加は、機器のプレハブ化率を高めることを可能にした。特に、PCVではつり込み分割数で38%に、つり込み後の溶接線長は94%(PCVを同一設計に仮定すると62%)に減少した。

(3) デッキプレート工法による機器、配管工事の前倒し

建屋のスラブ工事で、従来の木製型枠ステージング支持工



図7 機械工事用130tタワークレーン 機械工事用タワークレーンを我が国最初に130t級に大容量化し、PCV、その他機器のプレハブ化率向上と搬入作業の効率化を図った。

法では、スラブコンクリート打設後養生し、ステージングの撤去の後にスラブ下の機器を搬入していた。機器据付の早期化を要するエリア、スラブ施工後の機器搬入に問題のあるエリア、又は通路などスラブ下スペースを早期に活用したいエリアなどでは、前記の工法に代わり、スラブコンクリート打設荷重の支持をデッキプレートと鉄骨梁で行ない、ステージングなどの支保工を省いて下部空間を早期に確保する工法を採用した。これによって、機器搬入据付開始を約3箇月前倒しが可能となった。

(4) 原子炉建屋プールライナの大パネル プレハブ工法

機器仮置プール、使用済み燃料貯蔵プール、原子炉ウェルプール、キャスクピットなどに採用した大パネル プレハブ工法は、図8に一例を示すように、プールライナを箱型にプレハブし、つり込み設定した後にコンクリート打設する工法である。ライナがプールの型枠を兼ねることによって型枠や足場などの建築作業が削除され、また、機械側現場での溶接、その他の作業が大幅に減少する。従来、ライナの据付はRPVつり込み後に行なっていたが、これをRPVつり込み前に完了させることによって、RPVつり込み後の機械作業量低減に大きな効果があった。

(5) 炉内構造物の工場組込み

従来プラントでは、炉内構造物の据付工程がクリチカルパスであったが、ジェットポンプなど炉内構造物の一部を工場組込みとした結果、クリチカルパスは炉内構造物据付から原子炉建屋天井クレーン稼働開始までの建屋工事へ移行した(図5)。

(6) 機器・配管のモジュール化

現地作業量、特に、溶接作業量削減のための有力な方法は、あるまとまったエリアの機器、配管、弁などをモジュールにまとめて大型プレハブし搬入する工法である。モジュール化設計に際しては、大型配置モデルを有効に活用している。図9にその一例を示す。他の方法として、これまでにエルボレス配管(曲げ管)の採用、配管スプールの長尺化、配管と弁の

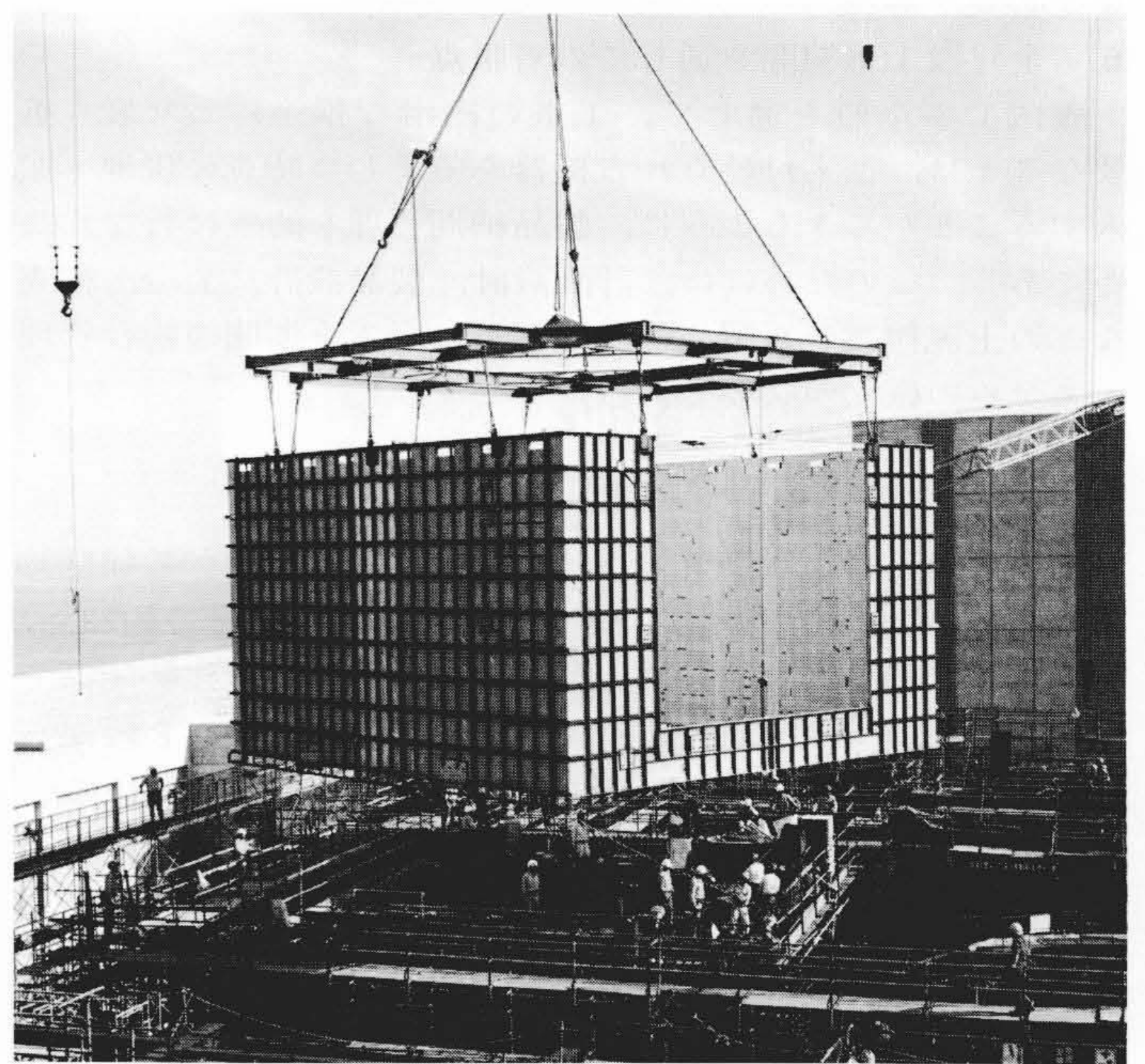


図8 プールライナ大パネル プレハブつり込み状況(ドライヤ・セパレータ・プールの例) ライナ現場据付作業が削減されるとともに、ライナが型枠を兼ねるため建築作業も削減され、機械工事と建築工事が幅そうする現場の混雑を緩和する。

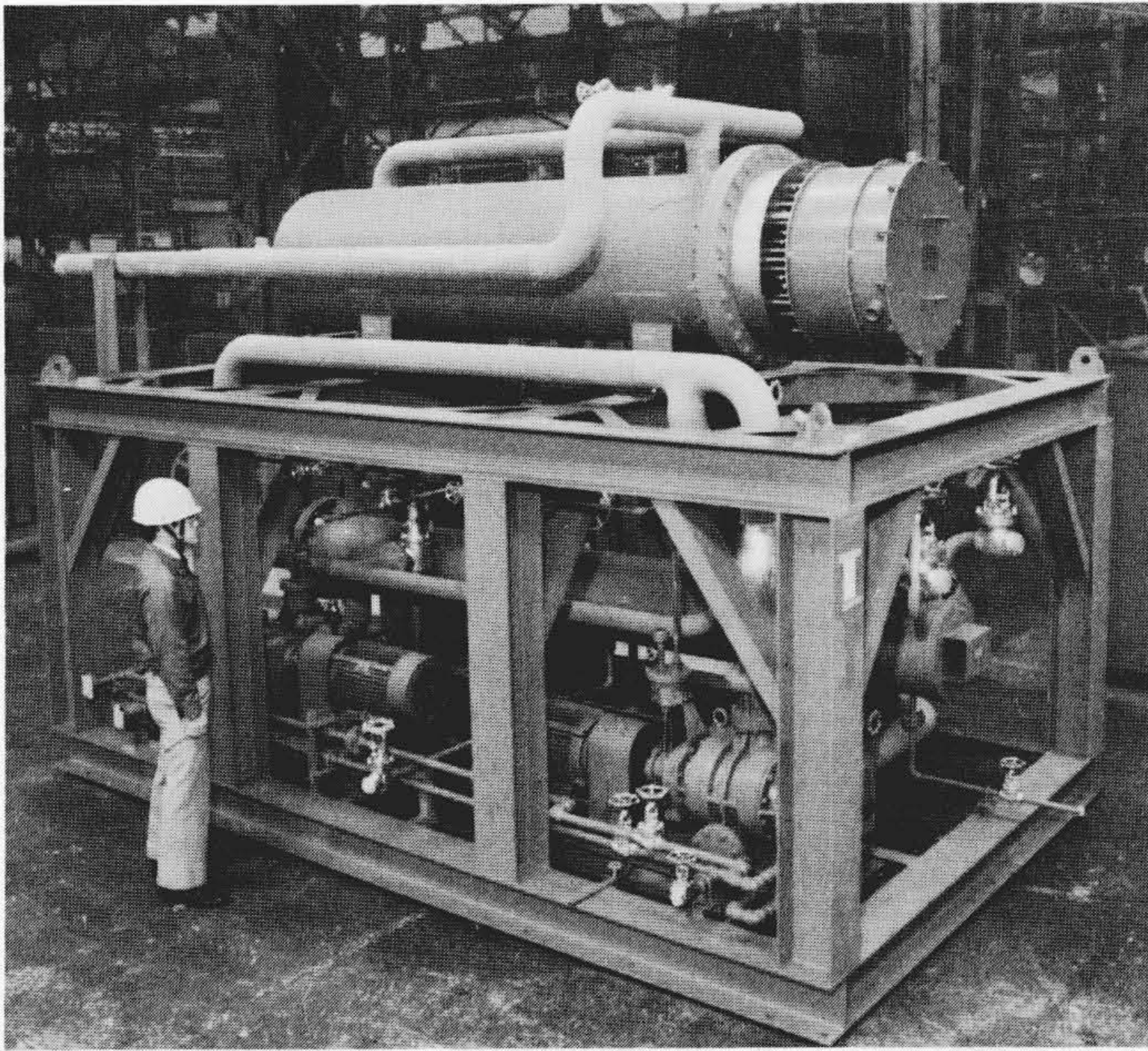


図9 機器・配管モジュール化の一例 脱湿塔再生装置の例を示す。再生ガス加熱器、冷却器、ブロワ、配管、サポートなどを一体化組立している。

一体化などの広範囲な対策を行なっている。これらの溶接点削減策は供用期間中検査の対象を減少させ、定期検査時の被曝量低減にも有効である。

(7) HICAT工法とケーブルの多心化

従来は中央盤と現場盤や機器間は直接結線する工法であったが、最近では中継集中端子箱を中央操作室及び必要に応じて現場に設け、極力多心ケーブルを使用してケーブル総布設量を減少させケーブル布設工程を短縮するとともに、中央盤の据付を待たずにケーブリングを先行させることができるHICAT(Hitachi Cabling Techniques)工法を採用している。

5 最近の建設管理の改善

原子力発電プラントのように、建設期間が長く、しかも膨大な数量の製品、図書などが扱われる大型プロジェクトでは、大型コンピュータを用いた総合的な管理システム体制の確立が必要である。日立製作所を中心とする日立グループ関連会社では、図10のようにプロジェクトの上流から下流まで、各段階で種々の目的のために多くの管理システムを用いている。この中の中核システムであるBPMS(Big Project Man-

agement System)について、以下に紹介する(図11参照)。

(1) 現地据付工程と同期化した総合期限管理

このシステムでは、各工場と現地との期限に関する情報を一元化し、プロジェクトの総合期限管理機能を向上させることにねらいがある。すなわち、設計から製作、現地据付作業を計画どおりに実行させるために、必要な製品、図書の同期化を行なうものである。

(a) 製品の同期化管理……機器、電気品、配管などの設計完了、現着日、据付開始日、据付完了日を製品単位に登録し、現地が必要とする時期に工場から供給するように管理する。

(b) 図書の同期化管理……製品に付随する図書(施工図、要領書など)を現地据付の必要時期に供給するように管理する。

(2) コンピュータによるプロジェクト総合管理

プロジェクト全体の基本日程をはじめ、各工場の生産計画と進捗状況、現地での工事計画など、プロジェクトを効率的に進めるために必要な多量の情報をコンピュータによって集中管理し、プロジェクト全体の状況を的確に管理する。

また、現地と工場間をオンライン化し、プロジェクト全体の最新の情報をタイムリーに提供することによって、現地工程と同期化した各製品の生産計画、生産管理を確立し、問題点を事前に把握することを可能としている。

(3) 実績データの収集

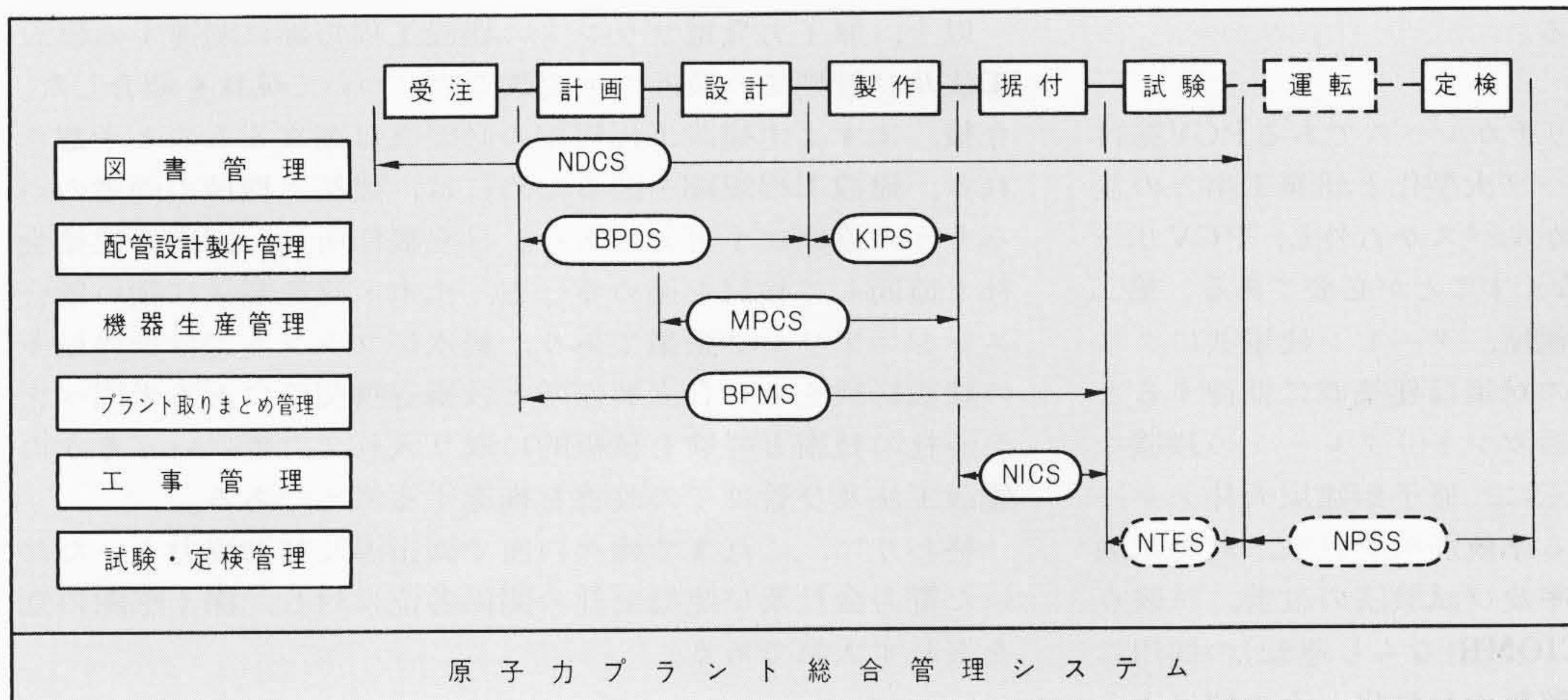
原子力発電プラントのような大型プロジェクトでは、その正確な実績データを収集することがこれまで困難であった。本システムによって、据付進捗管理、それに対応した据付工数などの実績を時系列的に収集、把握し、次期プラントの計画へ反映させることが可能となった。

6 今後の方向

今後の方向としては、前述の路線の拡大発展を主体に考えているが、その特徴を以下に述べる。

(1) プレハブモジュール化の拡大

現場作業量の低減の方針に沿って、PCV、RPV、復水器、機器、配管、ケーブルトレイなどのプレハブモジュール化の拡大を進めている。このプレハブモジュール化の拡大に当たって問題となる搬入用揚重機としては、海外で多く使用されている移動式クレーンが効果的と考えられる。従来の固定式タワークレーン、RPVリフティングデバイス、発電機ステータリフト装置、岸壁ジンボークレーンなどの目的別各機種に比較して、移動式クレーンは機動的使い方ができ、しか



注：略語説明
 NDCS(図書発行管理システム)
 BPDS(配管設計、干渉チェックシステム)
 KIPS(配管生産管理システム)
 MPMS(機器生産管理システム)
 BPMS(プラント取りまとめ管理システム)
 NICS(工事管理システム)
 NTES(試験管理システム)
 NPSS(プラントサービス管理システム)
 定 検(定期検査)

図10 原子力プラント総合管理システムの構成

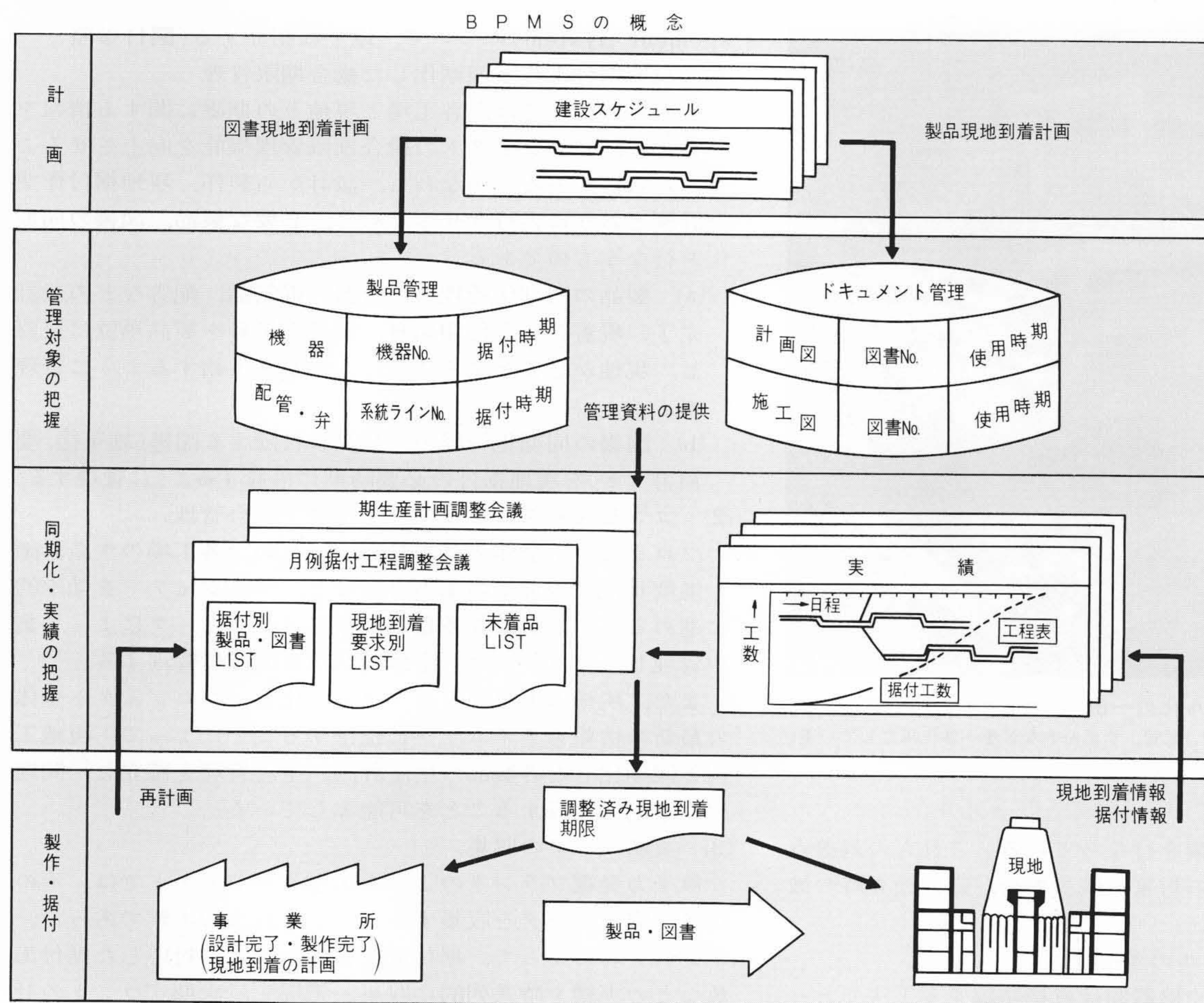


図11 BPMS(Big Project Management System)の概念 現地工程と同期化した図書、製品などの総合期限管理、プロジェクト総合管理、実績データ収集などを行ない、プロジェクトの的確な運営を行なう。

も建築工事との干渉が少なくなる利点があるが、作業場所、その他を十分検討して採否を決める必要がある。

プレハブモジュール化の拡大に当たって、他の一つの問題点はシステム計画、配置計画、機器・配管・サポートなどの設計などのエンジニアリングスケジュール及びこれに伴う官庁許認可スケジュールの先行化を必要とすることである。プレハブモジュール化の程度にもよるが、少なくとも従来工程に比べ、プレハブモジュールの製作工程の追加、大型プレハブモジュールの海上輸送化による輸送期間増大、冬季海上輸送不能サイトでの現地保管期間の増大、デッキプレート工法によるプレハブモジュールの先行投入などによるかなりの期間のエンジニアリングスケジュールの先行化が要求され、今後の課題として検討している。また、この設計の先行化は他の関連設計に影響し、図書発行と製品出荷の早期化をもたらし、建設工程への好影響が期待される。

(2) クリチカルパスの短縮対策

まず、第一に建設前半でのクリチカルパスであるPCV据付工事について、いっそうのプレハブ大型化と建築工事との並進化を図ることによってクリチカルパスから外し、PCVリークテスト前の建築側待ち工程をなくすことが必要である。第二に、天井クレーン稼動が原子炉建屋、タービン建屋共にクリチカルパスに入っており、これの対策は建築側に期待するところが大きい。機械側でも仮設ガントリクレーンの設置などの対策検討も必要である。第三に、原子炉建屋天井クレーン稼動後のクリチカルパスである系統別機能試験、起動試験などについて、各系統の試験順序及び試験法の改善、試験点の見直し、改良炉心及び改良PCIOMR(ならし運転)の採用に伴う起動時間短縮、試験データ解析の自動化、その他による

合理化、効率化が必要である。

(3) 天候対策

今後の原子力発電プラントの立地は、冬季悪天候サイトが比較的多くなると予想される。この場合、建設作業と製品の輸送作業は悪天候に影響されて大幅に長い工程となるおそれがある。この対策として、作業現場の天候防護、現地加工場でのオンサイトプレハブ及び工場プレハブモジュール化の拡大による現場作業量の低減、冬季輸送不能に備えた現地保管場所の設置と製品納期管理などの対策が必要である。作業現場の天候防護対策としては、PCV内外作業に対する防護や建屋の外壁を利用した建屋内作業の防護などの対策を検討することも必要である。

4 結 言

以上、原子力発電プラントの建設工程短縮に関連する建設工法及び管理での最近の主要改善点について現状を紹介した。今後、ますます建設工程短縮の必要性は高まるものと予想される。建設工程短縮を図るためには、建築と機械の両者のいっそうの協調が不可欠である。日立製作所は、国内の建築会社と協同して検討を進める一方、土木・建築関係に強い総合エンジニアリング企業であり、軽水炉プラントでは世界最多の建設経験をもち日立製作所と技術提携関係にある米国ベクトル社の技術と経験を積極的に取り入れて、更にいっそうの建設工法及び管理での改善を推進する考えである。

終わりに、これまで種々の面で御指導及び御協力をいただいた電力会社及び建築会社の関係各位に対し、深く感謝の意を表わす次第である。