

# 高機能BWRプラントの完成

—東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所4号機—

Completion of Kashiwazaki Kariwa Nuclear Power Station Unit No. 4

小玉郁夫\* Ikuo Kodama

土屋豊彦\* Toyohiko Tsuchiya

山木和幸\* Kazuyuki Yamaki

田尻明德\* Akinori Tajiri



東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所4号機の外観

昭和63年2月に着工した東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所4号機は、BWRプラントの運転経験、建設技術を集大成した電気出力1,100 MWの最新鋭機で、平成6年8月に営業運転を開始した。

東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所4号機は、わが国の自主技術による軽水炉改良標準化計画の成果を取り入れたBWR(沸騰水型原子炉)プラントである。日立製作所は、先行姉妹機である柏崎刈羽原子力発電所5号機で実証された技術に加え、設計、建設の各分野にこれまでの運転経験、建設経験、研究開発に基づく改良技術、最新技術を適用した。

系統・設備面では、従来プラントでの経験に基づく種々の改良点を設計当初から反映した。設計手法においても、最新のコンピュータ技術を応用した三次元CADシステムを配置・配管設計などに当初か

ら全面的に適用し、設計の品質・効率向上を図った。

建設面では、柏崎刈羽原子力発電所5号機で導入した世界最大級の揚重能力を持つ大型移動式クレーンを駆使し、工場・現地で大型プレハブ化した機器、配管類を直接つり込む大ブロック・モジュール工法を適用した。

これらによって工事の安全性を確保しつつ建設工期短縮を達成するとともに、その後の試運転でもプラントは安定した良好な性能を示し、営業運転を開始した。

\* 日立製作所 日立工場

## 1 はじめに

東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所4号機(以下、柏崎刈羽4号機と言う。)は、電気出力1,100 MWのBWRプラントで、昭和63年2月に着工し、平成6年8月に営業運転を開始した。

柏崎刈羽4号機は、これまでに培ったBWR発電設備の運転経験、建設技術を集大成した安全性、信頼性、運転性、経済性に優れた最新鋭機であり、設計から建設まで各分野に最新の技術が適用されている。

ここでは、柏崎刈羽4号機の設計・設備、建設工法および試運転の特徴について述べる。

## 2 設計・設備の特徴

柏崎刈羽4号機は、わが国の自主技術による軽水炉改良標準化計画の成果を取り入れるとともに、最新技術の適用とこれまでの運転経験・建設経験を反映した設計・設備の改善が図られている。適用した新技術と設計・設備改善内容を表1に示す。その主なものの概要について以下に述べる。

表1 適用した主な新技術と設計・設備改善

最新技術の適用と運転経験・建設経験の反映によって各種の改善を図った。

項目	適用新技術・設備改善	効果
原子炉設備	三次元CADシステム	設計品質・効率向上
	ジルコニウムライナ型高燃焼度燃料	運転性、経済性向上
	PLRポンプ改良型ケーシングカバー	信頼性向上
	PLRポンプ改良型メカニカルシール	信頼性向上、長期運転サイクル対応
	改良型主蒸気隔離弁(PCV内側弁)	信頼性向上
	改良型主蒸気逃がし安全弁	信頼性向上
	非常用ガス処理系系統流量低減、フィルタトレイン1系列化	設備の適正化
	B-SUS使用済燃料貯蔵ラック	稠(ちゅう)密貯蔵対応
	原子炉建屋換気空調系の統合	設備の適正化
タービン設備	中空糸膜フィルタ型復水ろ過装置	運転性向上 廃棄物発生量低減
	活性炭希ガスホールドアップ塔数削減	設備の適正化
電気計装設備	PLRポンプ用静止型可変周波数電源装置	保守性向上
	原子炉格納容器内監視装置	監視機能強化
	回転体振動監視診断装置	診断機能強化
	総合デジタル監視制御システム	信頼性、保守性向上

注：略語説明 PLRポンプ(原子炉冷却材再循環ポンプ)、PCV(原子炉格納容器)、B-SUS(ボロン添加ステンレス鋼)



図1 三次元CADシステム

配置・配管計画をはじめ、多くの分野に当初計画から全面的に適用し、設計の品質・効率を向上した。

### (1) 三次元CADシステム

運転性、保守性および建設性を向上させたプラントを計画段階から作り込むために、最新のコンピュータ技術を応用した三次元CADシステムを配置・配管計画などに当初から全面的に適用し、設計—製作—建設—保守で利用するデータベースを一元化した。建築会社ともCAD連携の一環で電子化されたデータでの設計情報を交換するとともに、施工面でも協調を拡大した。これらによって、設計の品質・効率を向上した。適用例を図1に示す。

### (2) ジルコニウムライナ型高燃焼度燃料

初装荷炉心には、燃焼度をいっそう高めるジルコニウムライナ型高燃焼度燃料(ステップII燃料)を適用し、運転性、経済性を向上させた。上下2領域燃料、少数コン

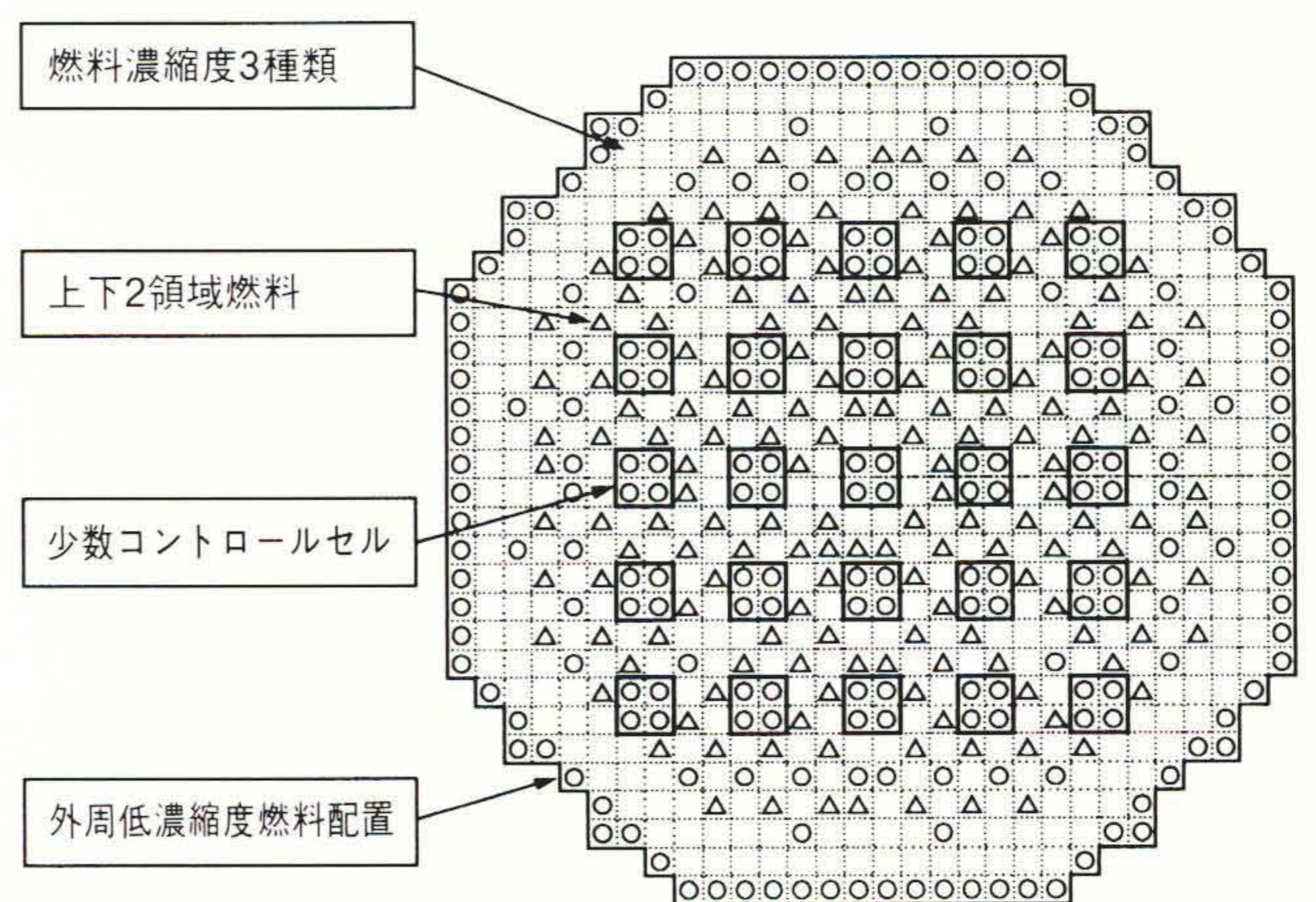


図2 初装荷炉心

日立製作所の改良炉心をベースに、日立製作所が独自に開発した多種類の濃縮度の燃料を用いた炉心を適用した。

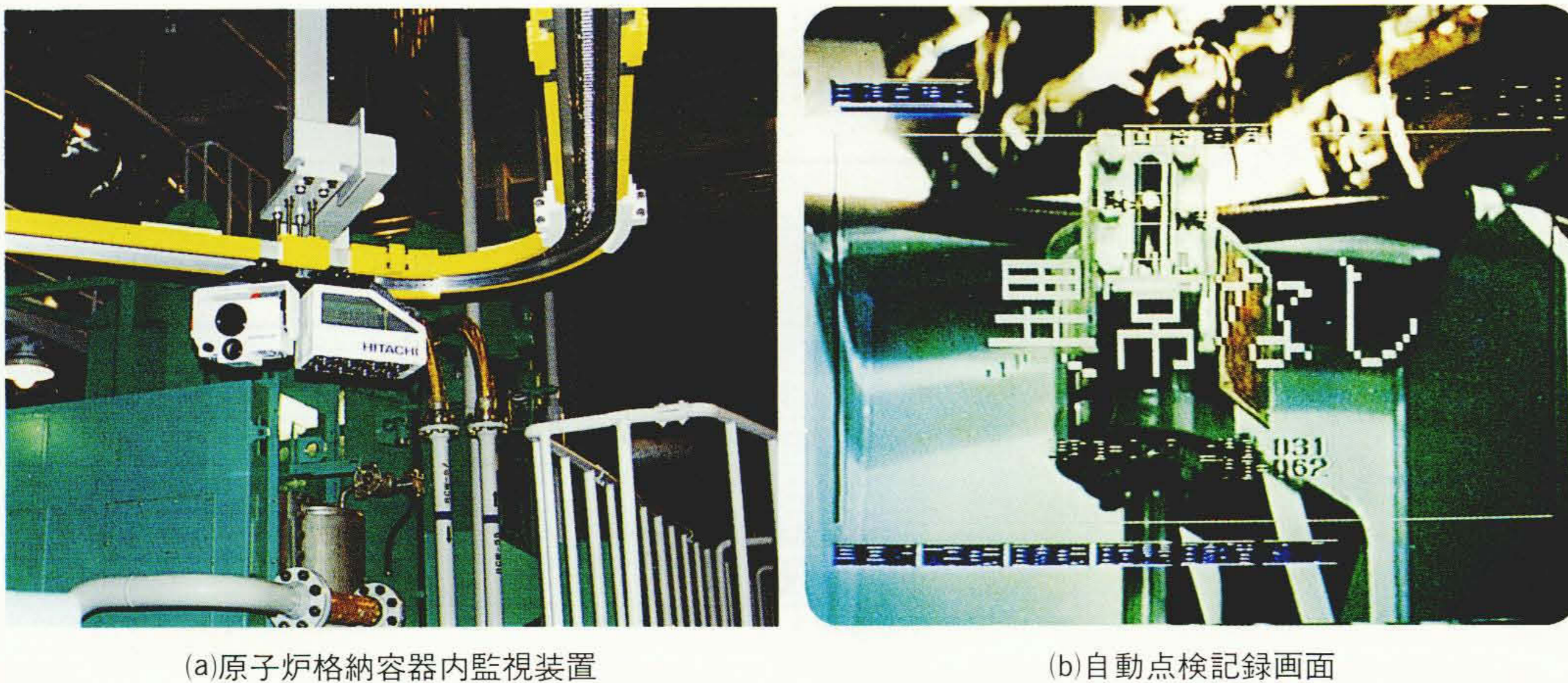


図3 原子炉格納容器内監視装置と自動点検記録画面  
原子炉格納容器内の主要機器を遠隔自動で中央制御室から監視を可能にした。原子炉冷却材再循環ポンプ用電動機の油面計を自動点検し、異常ないことを自動記録した画面例を(b)に示す。

トロールセルなどを適用した日立製作所の改良炉心に平衡サイクルを模擬した、多種類の濃縮度の燃料を組み合わせた炉心としている(図2参照)。

(3) 原子炉冷却材再循環ポンプ

駆動用電源装置には、従来の流体継手方式によるM-Gセットに替わって静止型可変周波数電源装置を採用し、ポンプ本体には改良型ケーシングカバーと改良型メカニカルシールを採用して保守性、信頼性の向上を図った。

(4) 中空糸膜フィルタ型復水ろ過装置

復水ろ過装置には、鉄クラッド捕そくによる差圧上昇が少なく、廃棄物の発生量も大幅に低減できる中空糸膜フィルタを採用し、設備もコンパクトなものにした。

(5) 原子炉格納容器内監視装置

プラント運転中に原子炉格納容器内の主要機器の監視ができるように、移動式監視装置を設置し、機器の監視機能を強化した。装置本体はカラーテレビカメラ、赤外線カメラおよびマイクロホンを装備して、ケーブルレスで自動走行するもので、タイマ運転によって中央制御室

から主要機器を自動監視点検できる(図3参照)。

(6) 総合デジタル監視制御システム

先行機では、光多重伝送・デジタル監視制御システムを常用系の一部に導入したが、柏崎刈羽4号機では適用範囲を常用系全般に拡大し、信頼性、保守性をさらに向上させた。

3 建設工事

3.1 建設の概要

昭和63年2月に着工した柏崎刈羽4号機は、平成6年8月に営業運転を開始するまで78か月、岩盤検査からは58か月と、先行機である柏崎刈羽5号機よりも約2か月短い工期で予定どおり完成した。建設工事の実績工程を図4に示す。

3.2 建設工法の特徴

柏崎刈羽4号機の建設では、柏崎刈羽5号機で国内で初めて導入した、世界最大級の大型移動式クレーン〔最大作業半径130 m, 最大つり上げ質量840 t(図5参照)]を

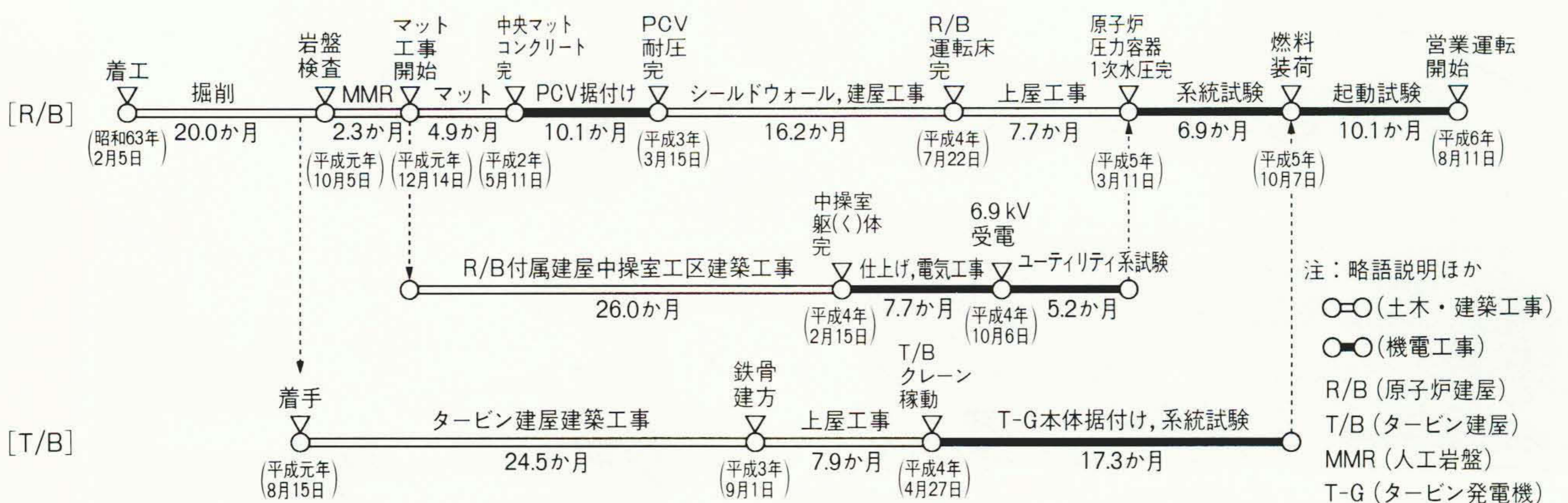


図4 建設工事实績工程

大ブロック・モジュール工法を適用したことにより、先行機に比べて建設工期を2か月短縮した。

建設当初から引き続き採用した。この大型移動式クレーンを有効活用した大ブロック・モジュール工法を基軸とする画期的な工法改善により、安全性と品質を確保しながら建設工期の短縮と工事の合理化を達成した。

柏崎刈羽4号機でブロック・モジュールを適用した範囲は、先行機である柏崎刈羽5号機に比べて大幅に拡大した。また、新しい試みとして、建築・機械・電気が協調した複合ブロック・モジュールを導入した。先行機との主なブロック・モジュールの適用比較を表2に示す。

柏崎刈羽4号機で適用した新しい工法の主なものの概要について以下に述べる。

(1) 原子炉格納容器内機器超大型モジュール工法

工程短縮に対応して、原子炉格納容器内作業の先行消化と平準化に着目し、三次元CADシステムを活用して原子炉格納容器内機器超大型モジュールを設計製作し、大型移動式クレーンで直接つり込む工法を採用した。このモジュールは、鋼構造物、主要配管・弁、空調ダクト、ケーブルトレー、電線管、計装配管、各種サポートおよび機器の一部で構成された、総質量400tに達する前例のないモジュールである(図6参照)。

(2) 中央制御室ルームモジュール工法

中央制御室は原子炉付属棟西側の最上階に配置され、建設工程のクリティカルパスになっており、全体工程を順守するうえで最大のポイントであった。

そこで、該当エリアに鉄骨構造が採用されたことに着目し、下部中央制御室との結合を考慮した2階層型ルームモジュールとして鉄骨軸組、制御盤用鋼製基礎、空調ダクト、天井下地材、ケーブルトレーなどを地上組立し、



図5 大型移動式クレーン  
重さ750tの原子炉圧力容器を直接つり込む大型移動式クレーンを示す。

表2 ブロック・モジュールの適用比較

先行機に比べてブロック・モジュールの適用範囲を大幅に拡大した。

主要ブロック・モジュール名称	重 さ (t)	
	柏崎刈羽5号機	柏崎刈羽4号機
R/B中央マット・アンカーボルト	—	90
格納容器本体	370	370
格納容器内機器	—	400
主蒸気トンネル室内配管・弁	130	100
CRD水圧制御ユニット	165	165
中央制御室	—	440
R/B屋根トラス・空調ダクト	—	270
循環水配管	—	70
復水器下部胴	—	310
復水ろ過装置回り機器	—	70
タービン発電機架台複合梁(はり)	—	60

注：略語説明 CRD(制御棒駆動機構)

2分割(300t, 440t)でつり込んだ(図7参照)。これは、大ブロック・モジュール工法の集大成にふさわしい世界初の画期的な工法である。ちなみに、中央制御室躯体工事完了から中央制御盤の搬入開始までを柏崎刈羽5号機と比較すると、工程を約2か月短縮した。

(3) 復水器下部胴モジュール工法

復水器は、従来、タービン発電機架台の明け渡し後



図6 原子炉格納容器内機器超大型モジュール  
原子炉格納容器内作業の先行消化と平準化を達成した。



図7 中央制御室ルームモジュール

この工法は建築・機械・電気が協調した画期的なもので、工程短縮に大きく寄与した。

に上部開口部から部材を順次搬入して据付け、冷却管は海側ヤードから挿入していたが、他の工事工程との関係で冷却管挿入時期に海側ヤードが使用できないため、復水器下部胴モジュール工法を採用することで対処した。

復水器下部胴モジュールは下部胴を冷却管方向に2分割で地上組立し、冷却管および低圧給水加熱器支持架台を組み込んだ重さ310tのもので、タービン発電機架台柱部の工事完了後に、大型移動式クレーンでつり込んだ(図8参照)。

#### (4) タービン発電機架台梁複合工法

前述の復水器下部胴モジュール工法を実現するためには、復水器下部胴モジュールのつり込み後にタービン発電機架台梁を施工する必要がある。従来のタービン発電機架台梁の工法では、下から梁を支える支保工が必要で、支保工と復水器下部胴モジュールが干渉するため従来の工法が適用できないという問題があった。

そこで梁躯体外側に鉄板埋込型枠を用い、その内側に鉄骨トラス型の支保工を設けて、鉄筋およびタービン発電機用アンカーボルトを配置した梁複合体を考案し、地上組立した梁複合体(重さ60t)を復水器下部胴モジュール搬入後につり込む工法を採用した(図9参照)。

### 3.3 作業環境の改善

3.2で述べた建設工法以外に、現場作業環境を整備・改善するために、以下のような施策をはじめとするさまざまな対策を積極的に取り入れた。

- (1) 現地加工場での配管・弁類のブロック・モジュール化と先入れ範囲の拡大
- (2) 自動化機器、省力化道具・工具の導入

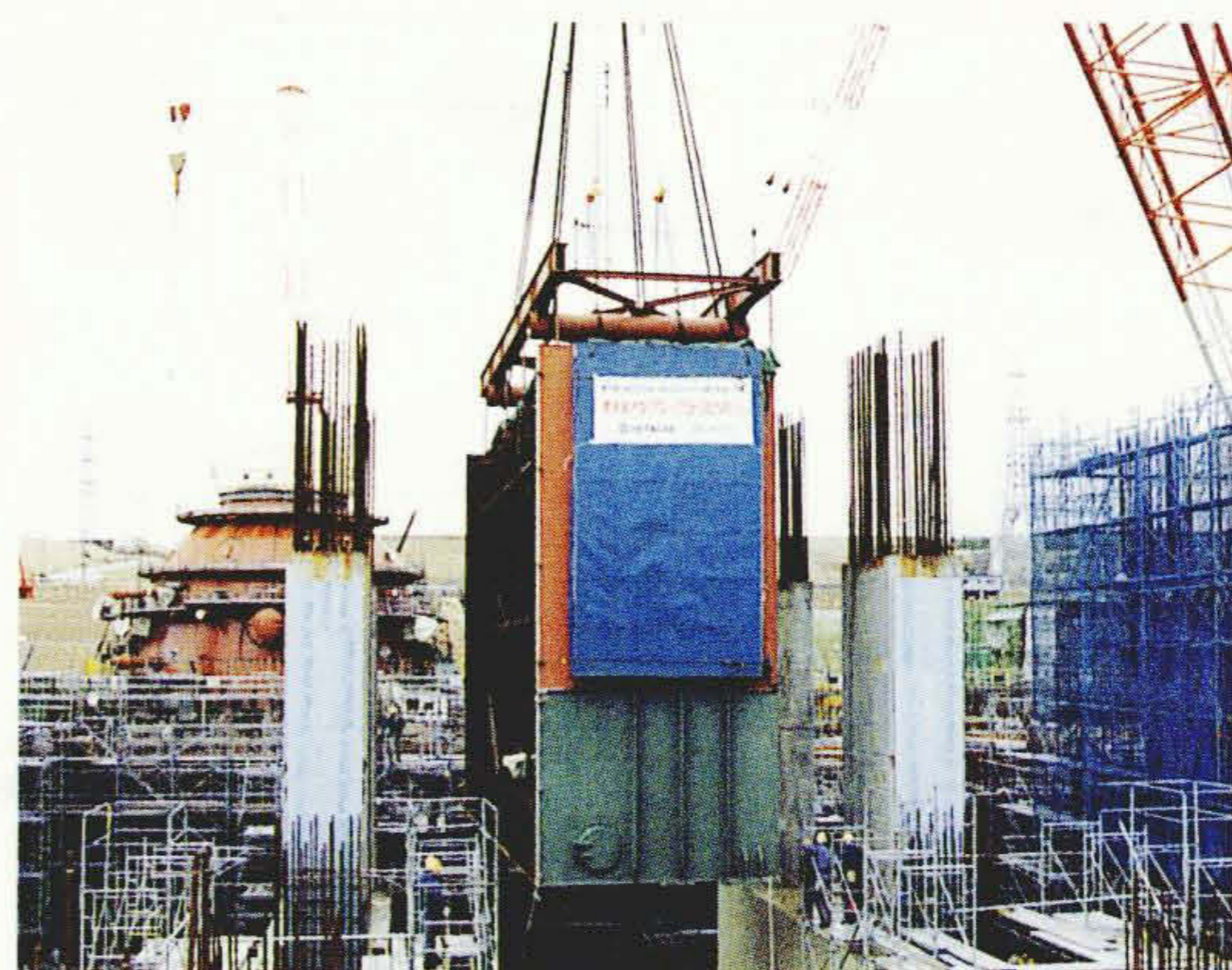


図8 復水器下部胴モジュール

冷却管を組み込むことによって工程確保に大きく寄与した。

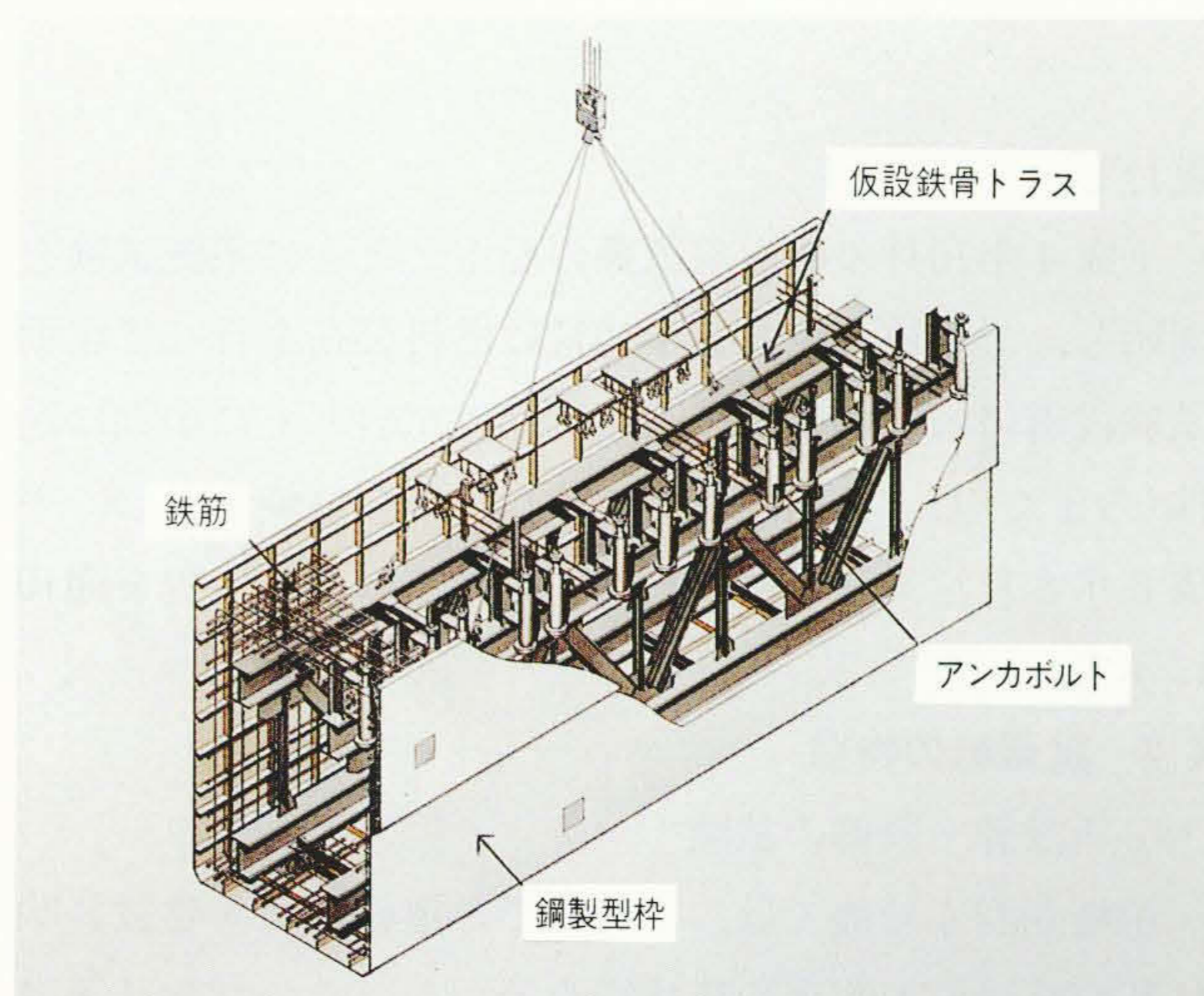


図9 タービン発電機架台梁複合体

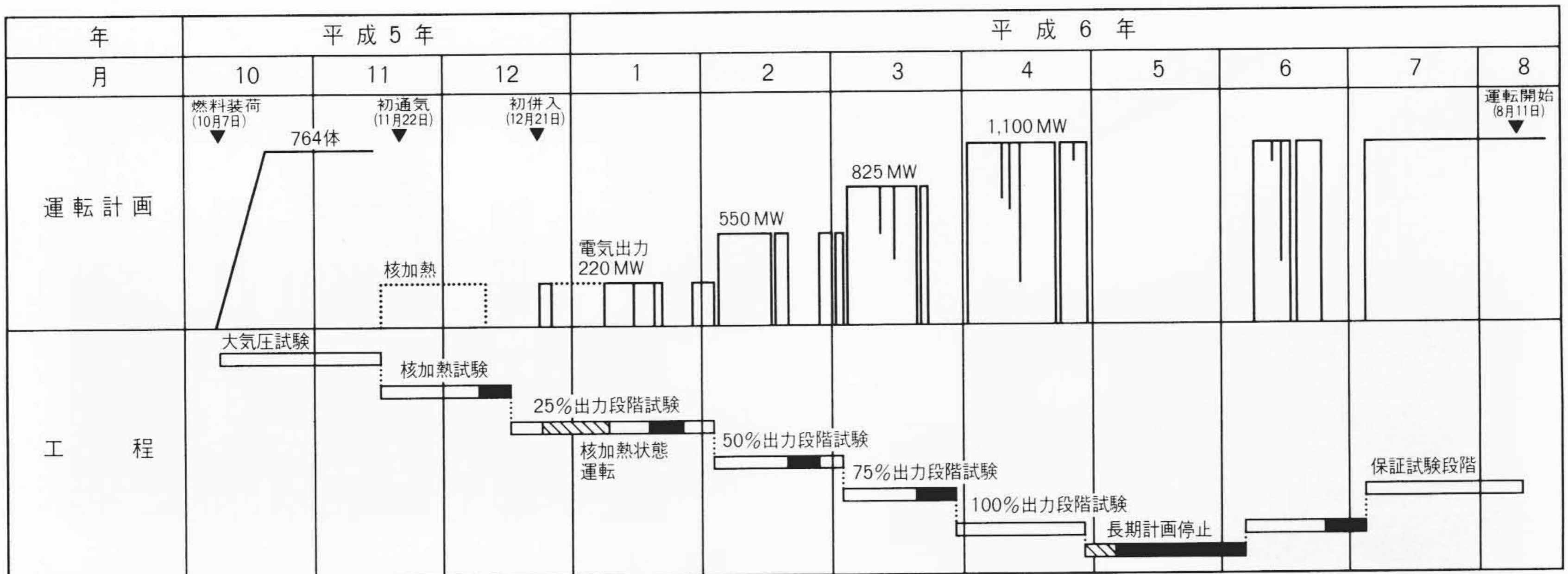
これによって、復水器下部胴モジュール工法が可能になった。

- (3) メッシュ足場・ブラケット足場の適用、軽作業用高所作業台車の利用などで足場を改善
- (4) 小物品リフタ(重さ制限300kg), 大物品リフタ(重さ制限3,000kg), 油圧式電気盤搬入装置などの機材搬入装置の活用
- (5) 原子炉格納容器トップヘッドシェルタをはじめとする雨養生可動式屋根, テントの利用
- (6) ローカル電気式集じん機, 空気清浄器の設置

## 4 試運転

### 4.1 試運転概要

柏崎刈羽原子力発電所のBWR-5型の最後のプラントと位置づけられる柏崎刈羽4号機(K4)では、「飾ろうK4・BWR-5有終の美」をスローガンに掲げて試運転を



注：□ (試験期間), ■ (計画作業停止期間), ▨ (休日停止期間)

図10 起動試験実績工程

起動試験は、燃料装荷から営業運転開始まで約10か月にわたって実施され、良好な結果が得られた。

遂行した。

平成4年10月の所内電源系の受電とともに系統試験を開始し、1年後の平成5年10月に燃料装荷を行って起動試験段階に入った。系統試験、起動試験ともに順調に進捗(ちよく)し、各設備は安定した良好な性能を示し、平成6年8月営業運転に入った。起動試験実績工程を図10に示す。

#### 4.2 試運転の特徴

##### (1) 新設計・設備の試験

柏崎刈羽4号機では、これまでの運転経験・建設経験に基づく設備の改善や新技術を適用し、その試験結果はいずれも良好であった。

新設計・設備の試験で主なものは、ジルコニウムライナ型高燃焼度燃料の炉心性能、原子炉冷却材再循環ポンプの運転・制御性能、復水ろ過装置の中空糸膜フィルタ性能、原子炉格納容器内監視装置の監視機能および総合デジタル監視制御システムの運転・制御性能である。

特に、原子炉冷却材再循環ポンプ用静止型可変周波数電源装置では、制御系切換、電源瞬時停止、高調波測定などの試験を実施した。中空糸膜フィルタを採用した復水ろ過装置では、試運転初期の鉄クラッド捕そくによる

差圧上昇と水質管理に細心の注意を払った。総合デジタル監視制御システムについては、その適用範囲が拡大されたことによって試験量も増大したため、所内電源系の受電前に仮設電源での試験を先行して開始するなど、適切な試験工程を確保するようにした。

##### (2) 試運転段階の品質保証活動

試運転を円滑に進めるために、工場・現地が連携し、新設計・設計変更点をはじめ先行機事例を踏まえた試験要領の事前レビューをきめ細かく実施した。また、試運転期間中は、重要機器の監視、水質管理なども強力に推進した。予防保全の面では、先行機の運転経験を反映して、事前に計画された機器の点検・手入りを各出力段階での計画停止期間中に予定どおり実施し、万全を期した。

## 5 おわりに

設計、建築の各分野で改良技術・最新技術を適用した柏崎刈羽4号機は、文字どおりBWRプラントの運転経験、建設技術を集大成したものにふさわしい最新鋭機として完成した。これはひとえに東京電力株式会社の関係各位から終始豊富な運転経験、建設経験に基づくご指導をいただいたことによるものであり、ここに厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 江尻, 外: 東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所5号機の建設, 日立評論, 72, 10, 973~980(平2-10)
- 2) 藤本, 外: 原子力プラント建設工法及び工事管理の新技術と実績, 日立評論, 70, 4, 371~378(昭62-4)
- 3) 下重, 外: 炉心燃料技術と原子燃料サイクルへの対応, 日立評論, 74, 10, 733~738(平4-10)
- 4) 高野, 外: 最近の計測制御技術, 日立評論, 74, 10, 739~744(平4-10)