

日本原子力発電敦賀2号機PCCVのコンクリート躯体工事

与那城 新*
木村 稔**
竹本 靖***

1. はじめに

日本原子力発電(株)敦賀2号機で採用されたPCCV(Prestressed Concrete Containment Vessel)は、コンクリート構造体自身が格納容器として、想定事故時の内圧に耐えるとともに、地震時の安全を保障する構造体となっている。

このためPCCVは、高強度かつ密実なコンクリートに十分な量の鉄筋を配したうえ、高レベルのプレストレスで全体を締めつける、という設計になっている。

本稿では、この我が国初のPCCV建設工事のうち、コンクリート躯体部分の施工について紹介する。

なお、構造体の形状や諸元については、本号の別稿に概要が示されているので、それを参照されたい。

2. ベースマット

2.1 打設計画

PCCVは、ベースマットと呼ばれる1枚の基礎スラブで、岩盤上に支持される。このベースマットは、平面が75×80m、厚さが8mという巨大なもので、コンクリート量が約46000m³に達する。そのため、事前に、ベースマットの形状、配筋状態、作業手順、工程、機器アンカーボルト等埋設物、コンクリート強度の違い、さらに、パッチャープラントの製造能力などを総合的に検討し、図-1に示すようなブロック割りを定めて、コンクリートの打設を行うこととした。

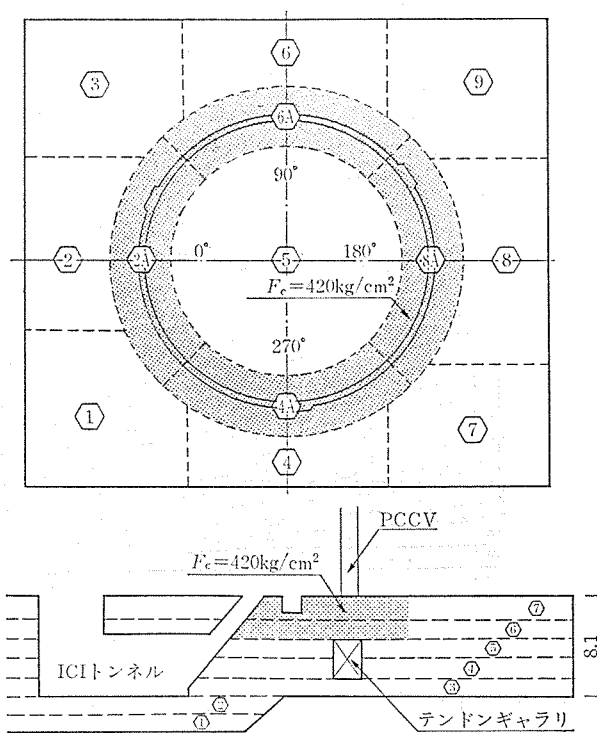


図-1 ベースマットブロック割り

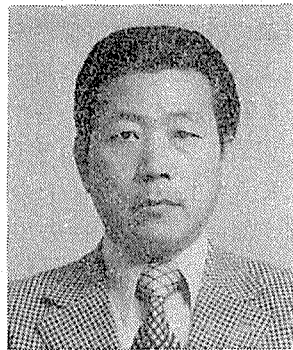
ベースマットに用いたコンクリートの設計基準強度は240 kg/cm²であるが、テンドンギャラリ(鉛直逆Uテンドン緊張作業用トンネル)上部に限り、PCCV円筒部・ドーム部と同等の品質のコンクリート(設計基準強度420 kg/cm²)を採用した(図-1参照)。

2.2 鉄筋の配置

コンクリートのボリュームに応じて鉄筋量も多く、ベースマットではD51という超太径鉄筋が、数段にわたって配置された。また、テンドンギャラリ上部、ICIトンネル(炉内計装配管スペース)上部、一次系重量機器のアンカーボルト据付け部、一・二次遮蔽壁の縦筋定着部などでは、特に形状が複雑なうえ、各資材が密集している。そこで、これらの部位では、鉄筋



* Arata YONASHIRO
三菱重工業(株)神戸造船所鉄構部



** Minoru KIMURA
原電敦賀共同企業体



*** Yasushi TAKEMOTO
(株)大林組技術研究所

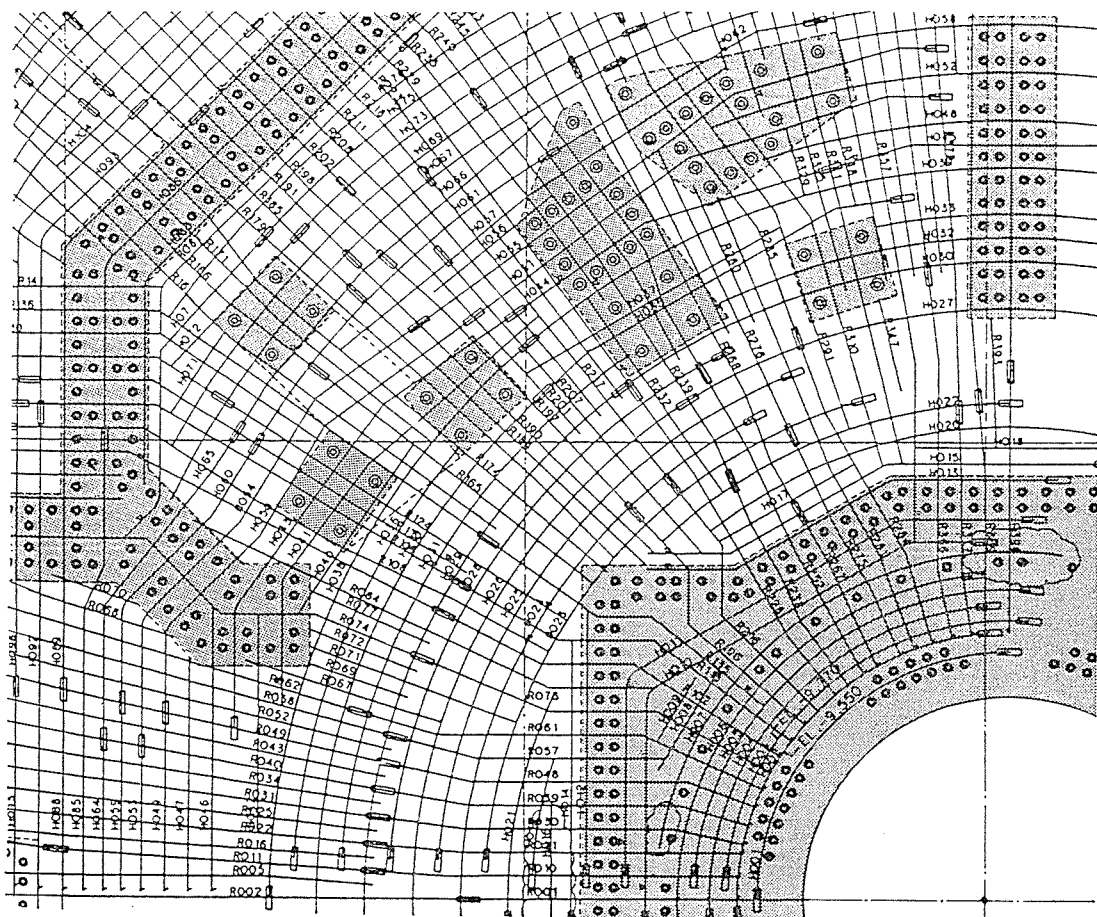


図-2 ベースマット上端配筋図(部分)

どうし・鉄筋と各種埋設物などの干渉回避、施工の手段と手順を入念に検討して配筋詳細図を作成した。この詳細図では、鉄筋形状や継手位置のほか、全鉄筋に1本ずつの記号をつけて、鉄筋加工リストと対応させている。

特に納まりが複雑となった一次遮蔽壁からICIトンネルにかけての部分では、配筋模型を製作して、詳細を決定した。この模型は、その後、サイトで作業手順の検討や、監督者・作業員の教育などに利用された。

ベースマット配筋の例(上端筋の一部)を図-2に示す。

3. PCCV 円筒部

3.1 打設および運搬計画

(1) コンクリート打設リフト高さ

原子炉建屋全体工程の中で、クリティカルパスとなるPCCV 円筒部工事では、コンクリート打設1回分の高さ(リフト高さ)が、工程を左右する大きな要因であり、以下の諸条件を考慮したうえで、3.0mというリフト高さを採用した。

- a. コンクリートの充填性
- b. 内側型枠でもあるライナに対するコンクリートの

側圧制限(4 t/m²以下)

- c. 1リフトのコンクリート量に対するバッチャプラントの供給能力

図-3に、円筒部のコンクリート打設リフト割りを、図-4に、標準リフトでの詳細工程をそれぞれ示す。

(2) 資材の運搬・荷さばき計画

サイト外側から4箇所の構台(図-5, J-1~4)を通して運び込まれた各種建設資材を、PCCV周囲に設置した4基のタワークレーンで、円筒外周の外部足場最上段に荷下し・仮置きした。この外部足場は、2列に並べた枠組で構成され、外側が安全通路、内側が作業スペースおよび資材仮置き場にあてられた。

3.2 鉄筋の配置

円筒部では、内側のライナがコンクリート部分に先行して立ち上がっていったので、配筋等の作業は常に、ライナ側から外側に向かって進められた。

円筒部の鉄筋はSD 40, D 51, 継手はカブラとネジを用いて締めつける機械式継手が採用された。

鉄筋重量が大きいため、鉄筋吊込み用の電動チェーンブロックを、ライナアンカに取り付けた足場用ブラケットから吊り下げ、作業の効率化を図った。

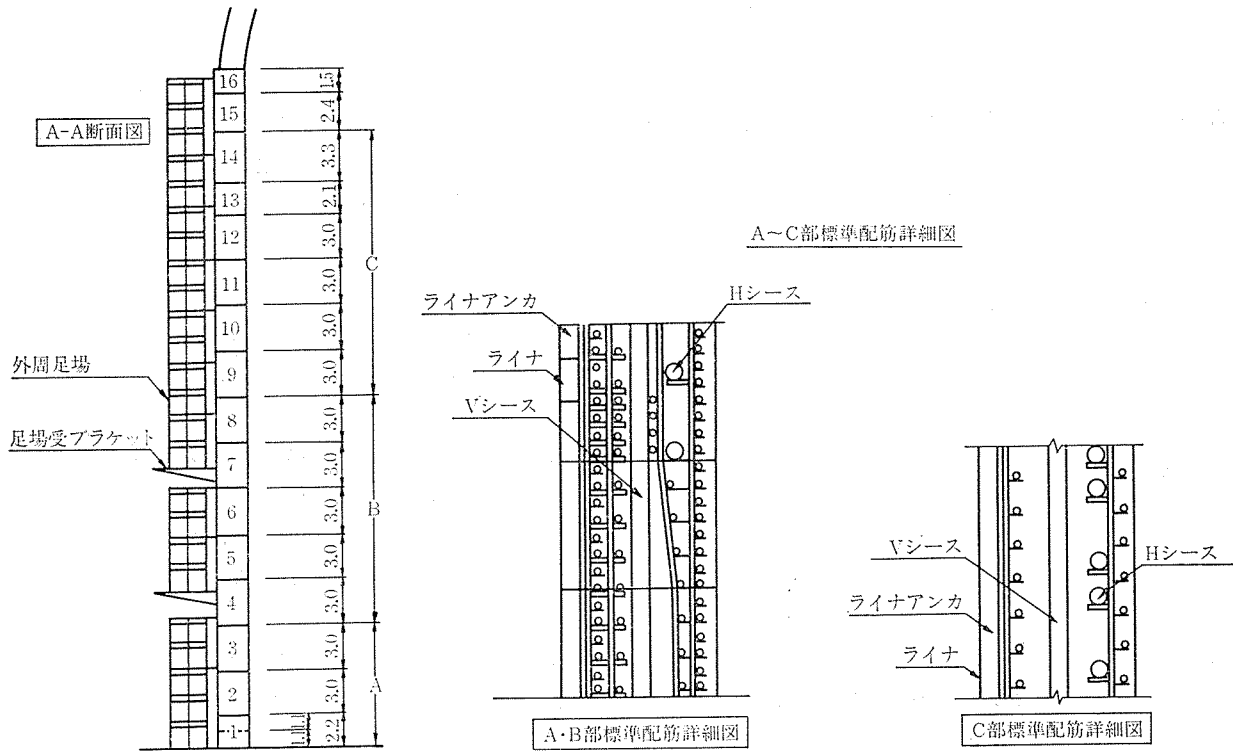


図-3 PCCV 円筒部コンクリートブロック割り

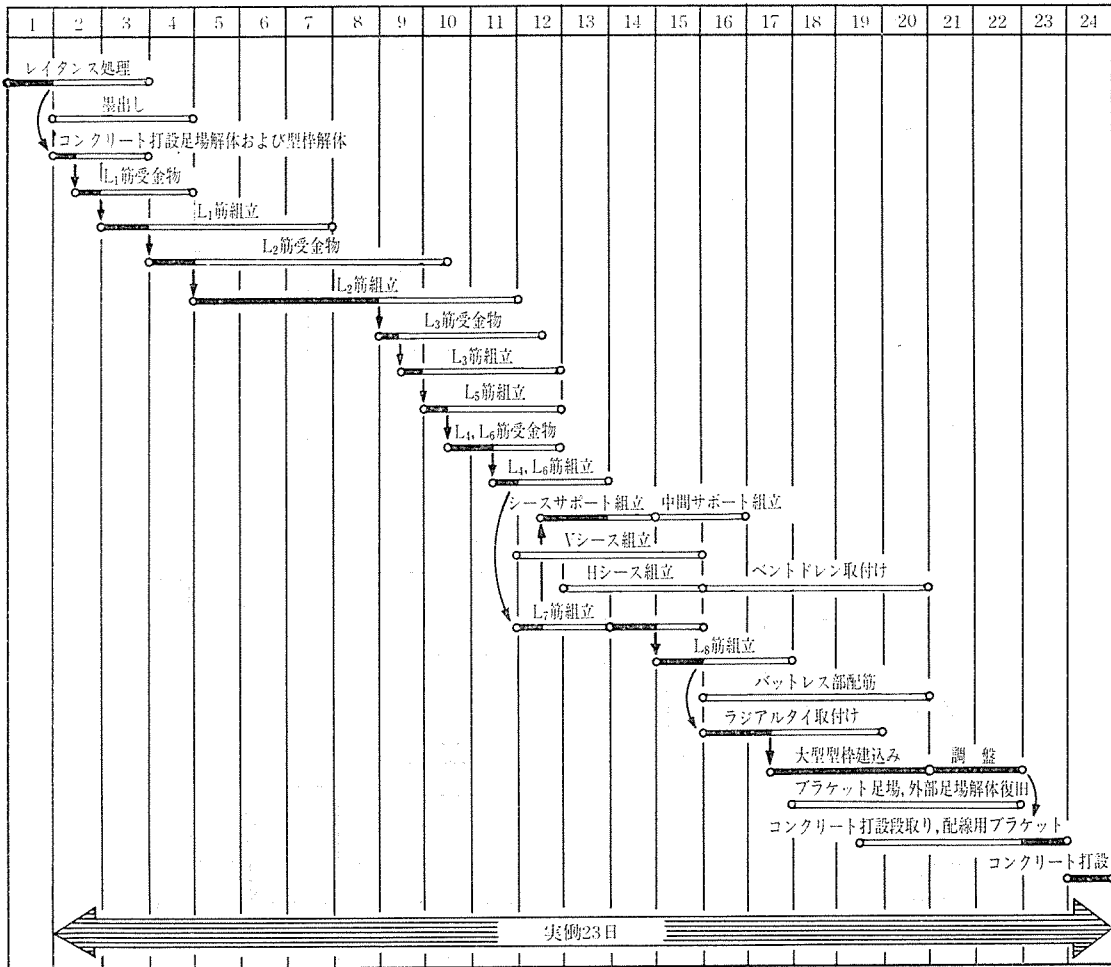


図-4 標準リフトにおける詳細工程 (黒太線はクリティカルパス)

鉄筋およびシースの配置では、位置の精度と安定性の確保および作業能率の向上を目的として、埋殺しの受架台を利用した。

図-6 に、円筒部鉄筋と tendon シースの配置フロー

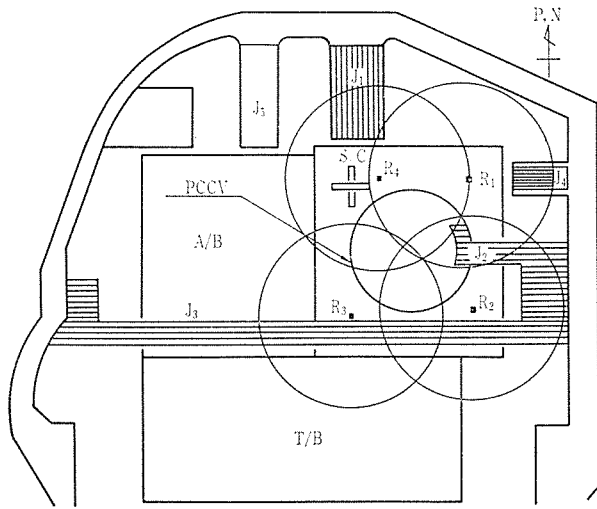


図-5 構台とタワークレーンの配置

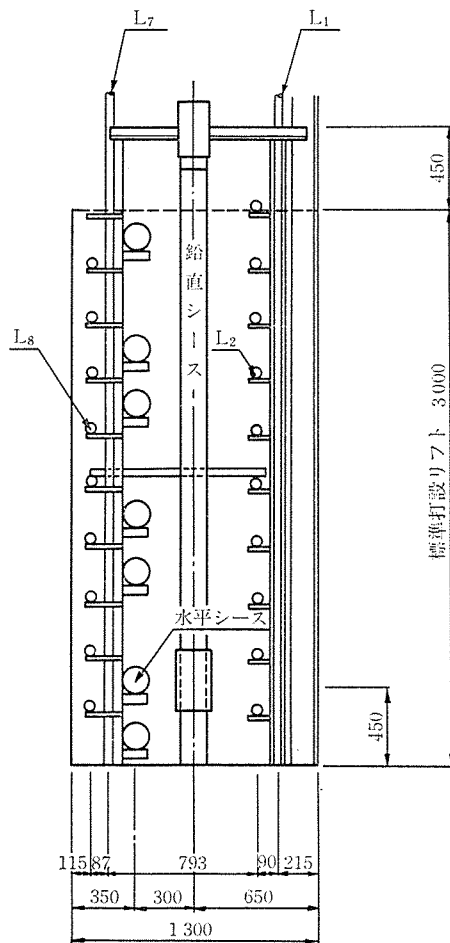


図-6 円筒部の一般部における鉄筋工事フロー

を示す。

配筋が複雑なうえ、他の埋設部材との干渉の恐れがあった機器搬入口やエアロック廻りに対しては、ベースマットと同様に、詳細設計時に、1/10 の模型を製作し、干渉回避や納まりを検討した。この模型も、サイトで作業手順の検討や監督者・作業員の教育に活用した。

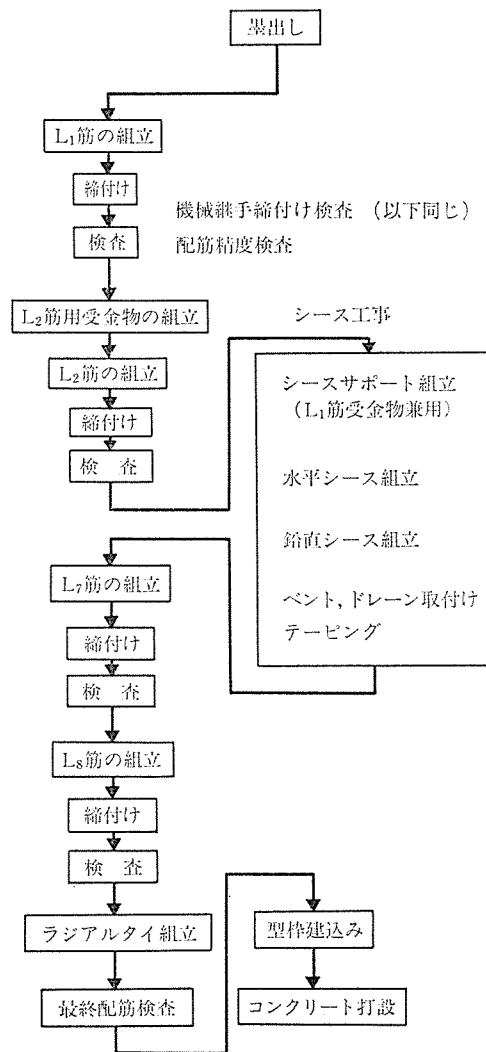
3.3 シース等の配置

図-6 に示したように、 tendon シースは、円筒壁ライナ鉄筋の組立て後、その鉄筋の受架台を兼用して組み立てられた。

水平シース（フープ tendon 用）の架台のピッチは、内径 140 mm、肉厚 0.6 mm というシースの剛性と要求精度を考慮して、約 1.5 m とした。

縦シース（逆 U tendon 用）は、コンクリート打継面から約 0.3 m 上部に継手を設け、その位置で定規を兼ねた支持アングルにより固定した。

このような受架台（鉛直サポート：L-75×6、水平つなぎ：L-65×6、L-50×6）を用いることにより、きわ



めて精度よく、かつ高い作業能率でシースを配置することが可能になった。

バットレス部分（フープテンションの緊張・定着端）では、トランプレート（トランペットシースとアンカプレートのセット）を、バットレス用鋼製型枠にボルトで固定し、型枠建込みと同時に、所定の位置に据え付けた。

3.4 型枠工事

円筒部の型枠には、バットレス部分で鋼製（厚 4.5 mm）の、その他の一般部分では合板製（厚 12 mm）の、いずれも幅約 4 m、高さ 3 m の大型型枠を用いた。

大型型枠の頂部で縦スティフナが、ライナとタイロッド（径 22 mm）で結ばれ、脚部は打設済みのコンクリートに埋めたインサートにボルトで締め付けられる、という方法で固定された。

図-7 に円筒部大型型枠の配置を、図-8 に同一般部型枠の施工手順を、それぞれ示す。

3.5 コンクリート工事

(1) 調 合

PCCV 円筒部および半球ドーム部のコンクリートには、以下のような品質上の要求が課せられていた。

- a. 高強度であること（設計基準強度 420 kg/cm²、た

- だし、管理材令 91 日）
- b. クリープ・乾燥収縮ひずみが小さいこと
- c. セメントの水和熱発生量が少ないこと

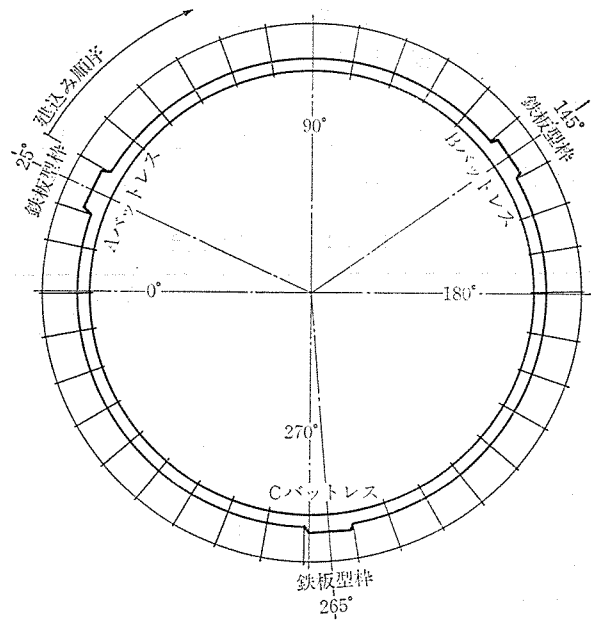
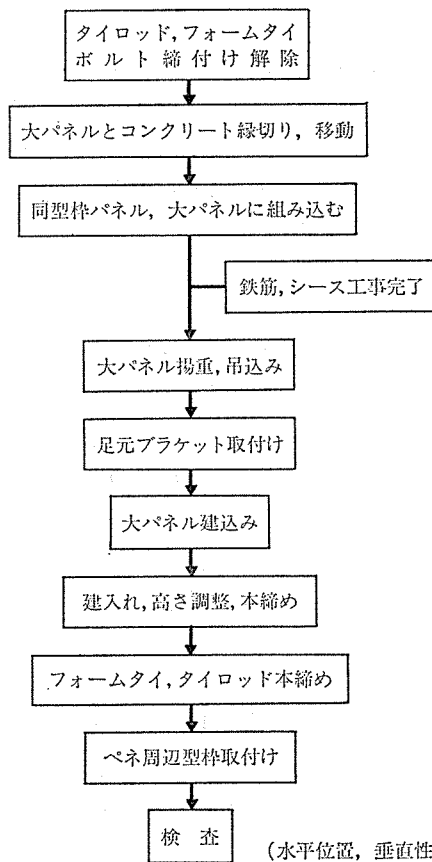


図-7 円筒部大型型枠配置



(注)
 ・型枠パネル—木製材料
 ・大パネル—鉄骨フレームに型枠パネルを組み込んだもの

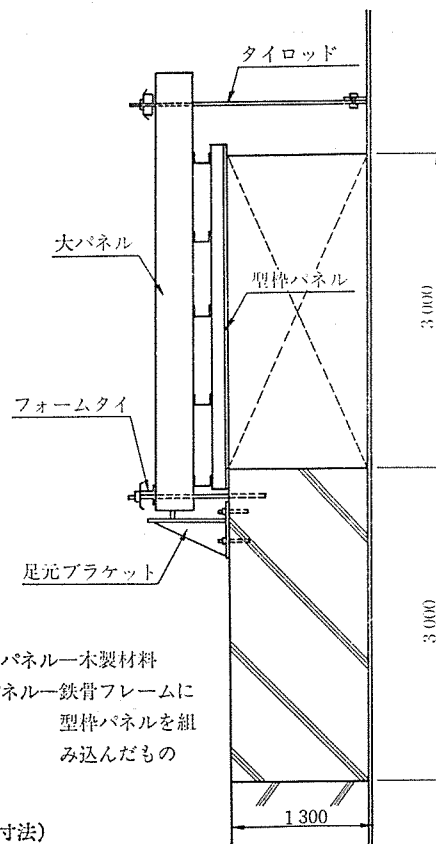


図-8 円筒一般部型枠の施工手順

- d. 耐久性・水密性にすぐれていること
- e. 施工性がよいこと

また、コンクリート打設工期が、円筒部のみでおよそ1年になるため、夏・冬期への配慮も必要であった。

それらの条件の下に、入念な試し練りや打設試験による検討を経て、表—1 に示すような基本調合を決定した。

特に、機器搬入口廻り、エアロック廻りでは、配筋や埋設部材が輻輳し、コンクリート充填の困難さが予測さ

表—1 コンクリートの調合

	標準調合	夏期補正調合	冬期温度補正調合 $T=30\text{ kg/cm}^2$
設計基準強度	420 kg/cm ²		
材 令	91 日 (13 週)		
ス ラ ン プ (打込み時)	8 cm		
水セメント比	45%	45%	43.5%
最大骨材寸法	25 mm		
セメント (中府熟ポルトランドセメント+フライアッシュ)	356 kg/m ³	367 kg/m ³	368 kg/m ³
水	160 kg/m ³	165 kg/m ³	160 kg/m ³
細骨材 (砂)	745 kg/m ³	735 kg/m ³	735 kg/m ³
粗骨材 (砂利)	1059 kg/m ³	1045 kg/m ³	1059 kg/m ³
混 和 剤 (AE 減水剤)	0.890 kg/m ³	0.918 kg/m ³	0.920 kg/m ³

れたので、流動化剤を用いて、打込み時スランプを 12 cm に上げるよう計画した。

(2) コンクリートの打設

円筒部コンクリートの打設計画は、工事着工に先立って行った打設試験の結果を参考として立案された。

円筒壁に沿って、径 140 mm のコンクリート用配管を囲らせ、約 3 m 間隔に設けたゲートバルブを計画的に開閉する、という打設方法が採用された。

図—9 に示すように、並行して4箇所の構台にポンプ車をアプローチさせ、平面的に円筒の約 1/4 ずつを受け持たせ、それに応じて作業員も4チーム編成とした。

これにより、一層約 40 cm のコンクリートを、所定の打継ぎインタバル (40~60 分) で、全体として水平な状態で平均的に打ち上げていくことができた。

このようにして、16 リフト、44.5 m 高さの PCCV 円筒部は、順調に、目標を上回るスピードで、コンクリートが打設された (58 年 6 月~59 年 6 月)。

4. PCCV ドーム部

4.1 打設計画と荷さばき

(1) 打設ブロック割りと工程

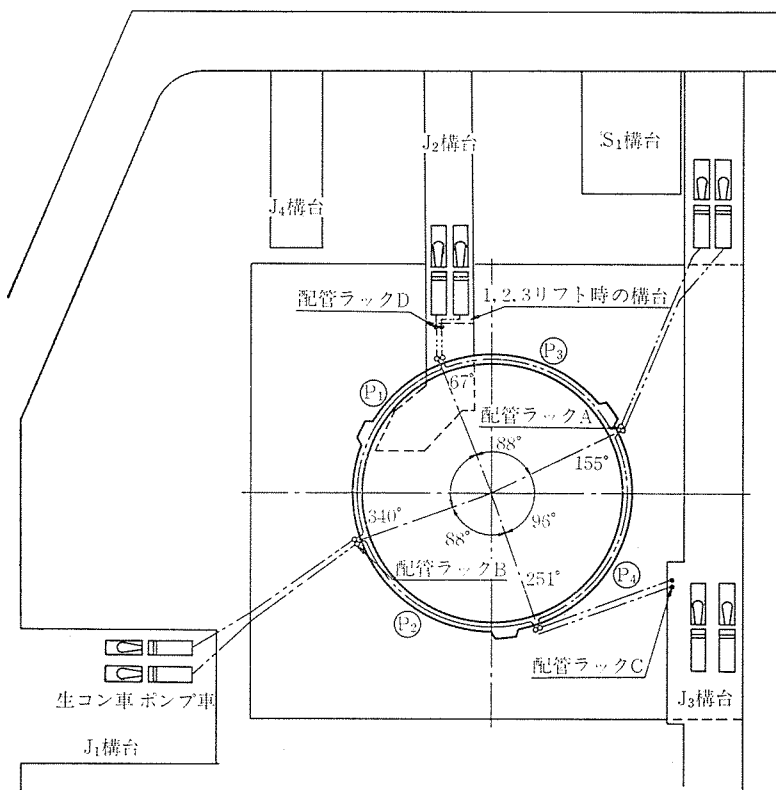
円筒部コンクリートの打設完了後、ドームライナの組立てや、エンクロージャビル (E/B, PCCV 全体を覆う 8 角形平面の鉄骨造上屋) の鉄骨建方など約半年の工程を経て、PCCV 半球ドーム部のコンクリート工事が始ま

った。サイト全体の作業としては、並行して行われた原子炉容器など主要機器類の搬入・据付けがクリティカルパスとなっている。

ドーム部では、その形状から、墨出し・足場・鉄筋とシースの架台・型枠・コンクリート打設方法を主眼に、工事計画が練られた。

コンクリート打設のブロック割りにについては、3.1 (1) で述べた理由に加えて、曲面であることによる、コンクリートの充填性や型枠内空気の排出といった問題を考慮し、頂部に近づくにつれ (傾斜が緩くなるにつれ) リフト高さを低くするよう計画した。

図—10 に、ドーム部コンクリート打設ブロック割りを示す。図—11 は、ドーム部作業のフローチャートである。ここでも、各リフトの作業は、ライナ側から外へ向かって進めるのを基本としている。



図—9 円筒部コンクリート打設時配管ルート

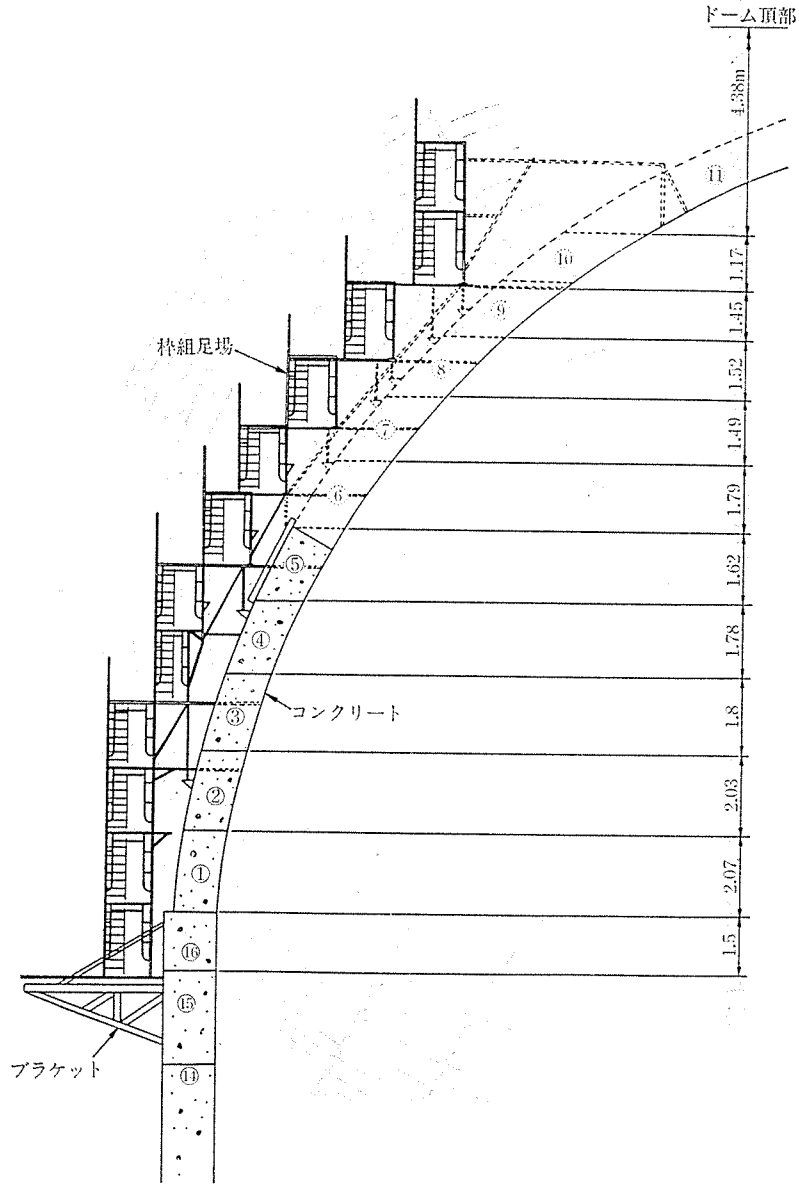


図-10 ドーム部コンクリート打設ブロック割り

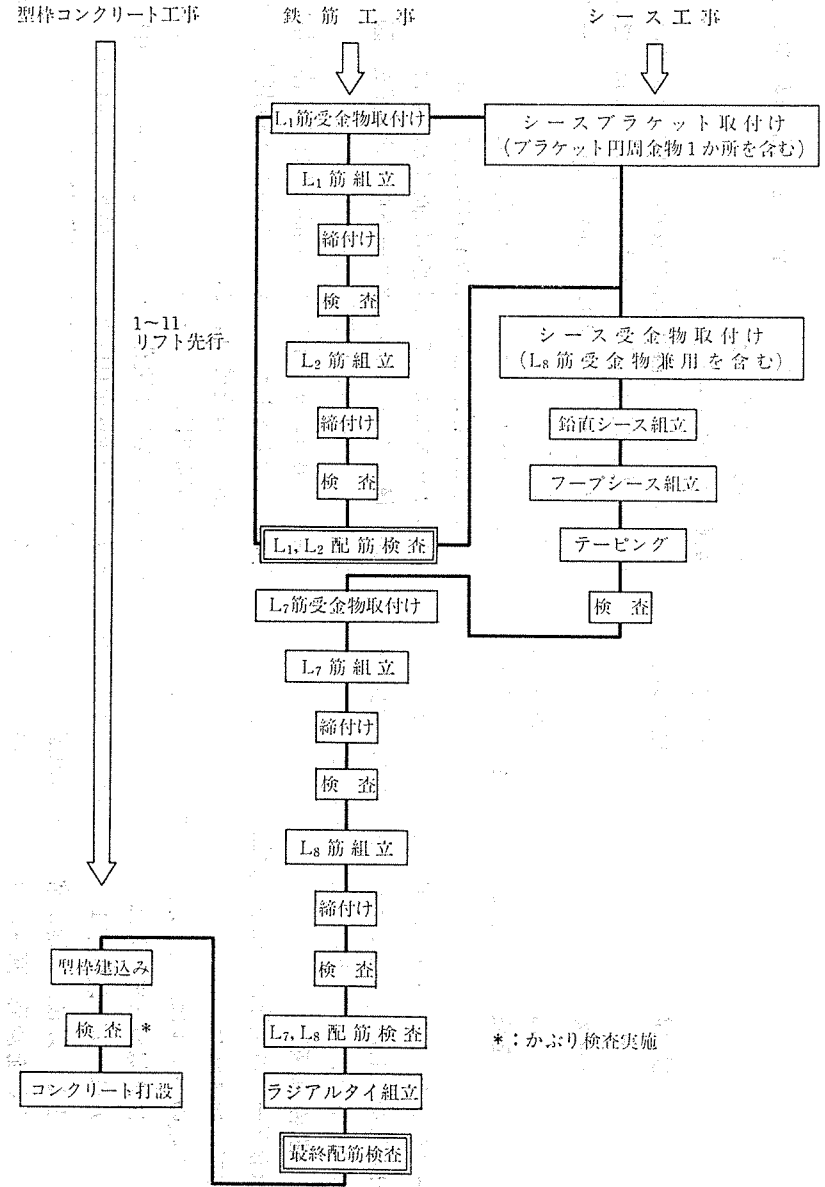


図-11 ドーム一般部作業フローチャート

(2) 資材の荷さばき

ドーム部コンクリート工事の時期には、PCCV 全体を覆う E/B の鉄骨がすでに建っていたので、ドーム部用各種資材は、E/B 屋上に設置したクレーン 3 台を用いて、同屋上に確保した資材仮置きステージに下ろされ、ここから、同屋根に設けた仮開口を通して、所定の場所に運搬された。

4.2 鉄筋とシースの配置

ドーム部でも、円筒部と同様に、アングル製の架台（ピッチ約 2m）を設け、鉄筋とシースの配置の精度と安定性を確保した。

フープテンドンは、ドームの下部にも配置されるので、円筒部から上方に延長したバットレスに、鋼製型枠とともに、トランプレットが据え付けられた。

4.3 型枠工事

半球形ドームの型枠は、以下の要領に従って加工および組立てがなされた。

- 1 枚のパネルは、上下方向にのみ曲げ加工し、水平方向は直線のままとした。
- パネルは、最下段（第 1 リフト）の下側で、幅を 1.0m とし、以後、目地が常にドーム頂部の芯に向かうよう幅を調整、高さはコンクリートのリフト高さに合わせた。
- 各バットレス間の中央点に縦目地が通るよう、パネルを配置し、寸法の調整をバットレスの廻りで行った。
- 外側型枠を使用するのは、最終（第 11）リフトの

手前までとし、以後（水平に近い部分）は、上部開放とした。

図—12 にドーム部型枠の割付けを、図—13 に同型枠一般部の組立て手順を示す。

4.4 コンクリート工事

ドーム部では、流動化剤は使わず、低スランプのコンクリートを、層打ち片押し方式（層厚約 0.4m）で打設した。締固めには、斜め挿入用の一本槍パイプレータを使用している。

コンクリートは、ポンプ車から径 125mm の配管を通して圧送し、配管先端に取り付けた長さ 6m のフレキシブルホースによって、所定の位置に分配した。

図—14 にドーム部コンクリートの配管径路を、図—15 に同コンクリートの打設状況を示す。

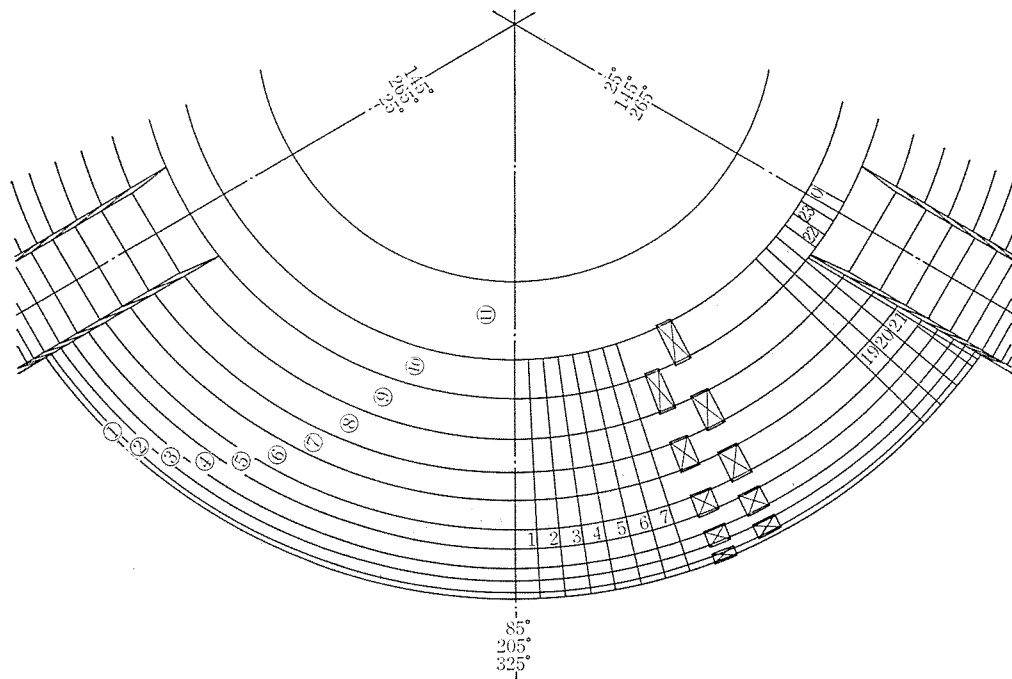
最終の第 11 リフトでは、下部のみ押え型枠を用い、上部は直押えとしたが、コンクリートの流出を防止するため、溶接金網を使用している。

ドーム部では、リフト毎に勾配が変わって、コンクリートの打設条件も変化するので、施工計画の妥当性検討と作業員の訓練を目的として、第 8 および第 11 リフトの部分模型（実大）を作り、打設試験を行った。

この試験の結果に基づき、施工性、締固め要領、型枠内空気の排出法、曲面直押え仕上げ要領などを検討し、実作業にフィードバックした。

5. コンクリートの品質管理

PCCV の躯体コンクリートは、一般のコンクリート



図—12 ドーム部型枠割付け

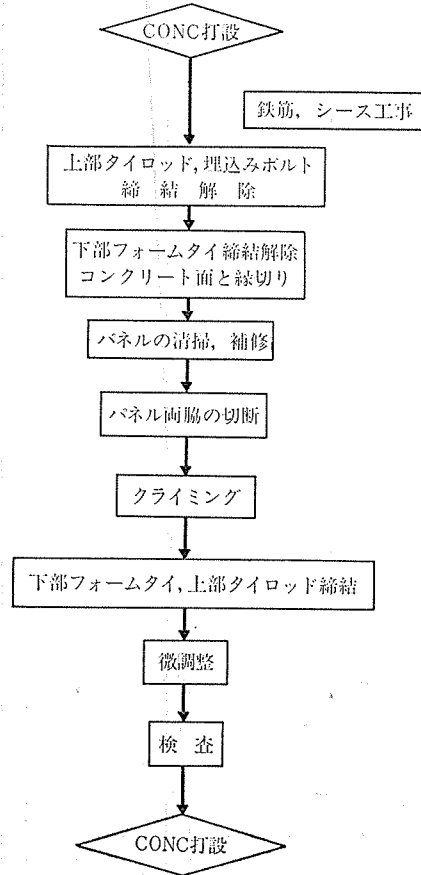


図-13 ドーム部一般部型枠組立手順

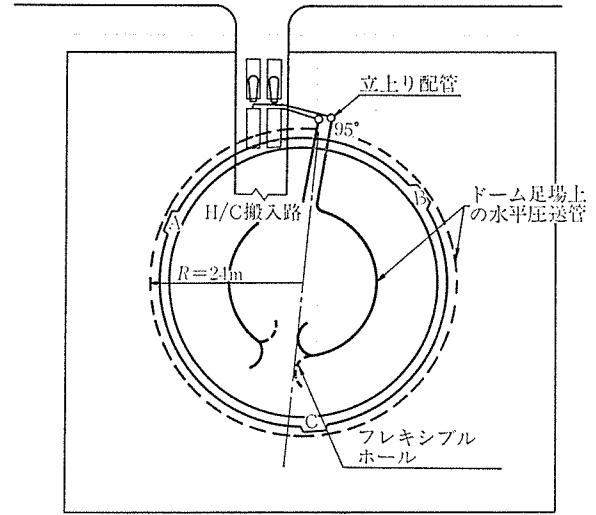
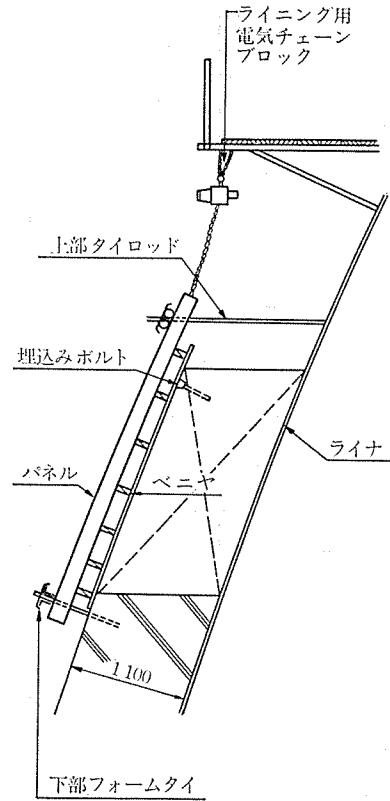


図-14 ドーム部コンクリート配管経路

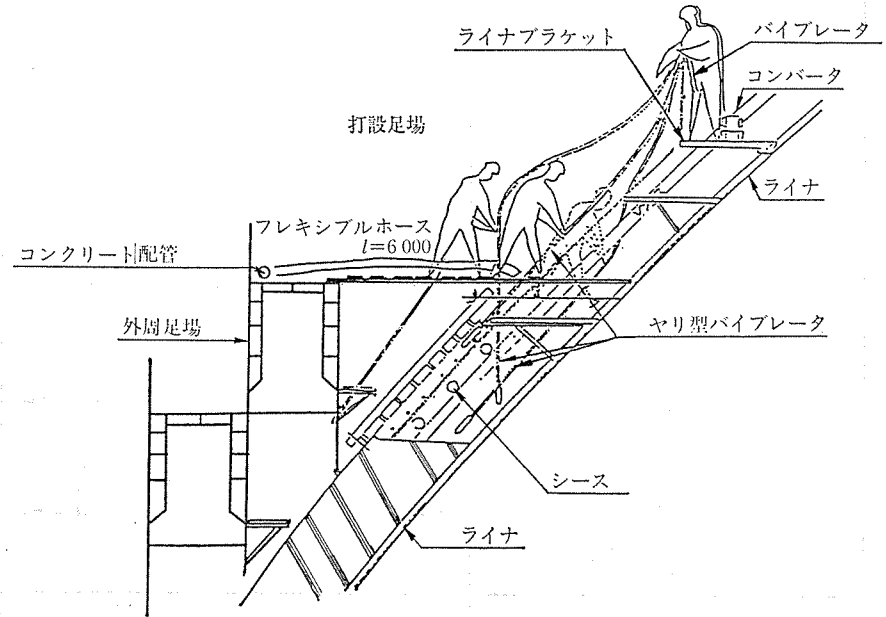


図-15 ドーム部コンクリート打設状況

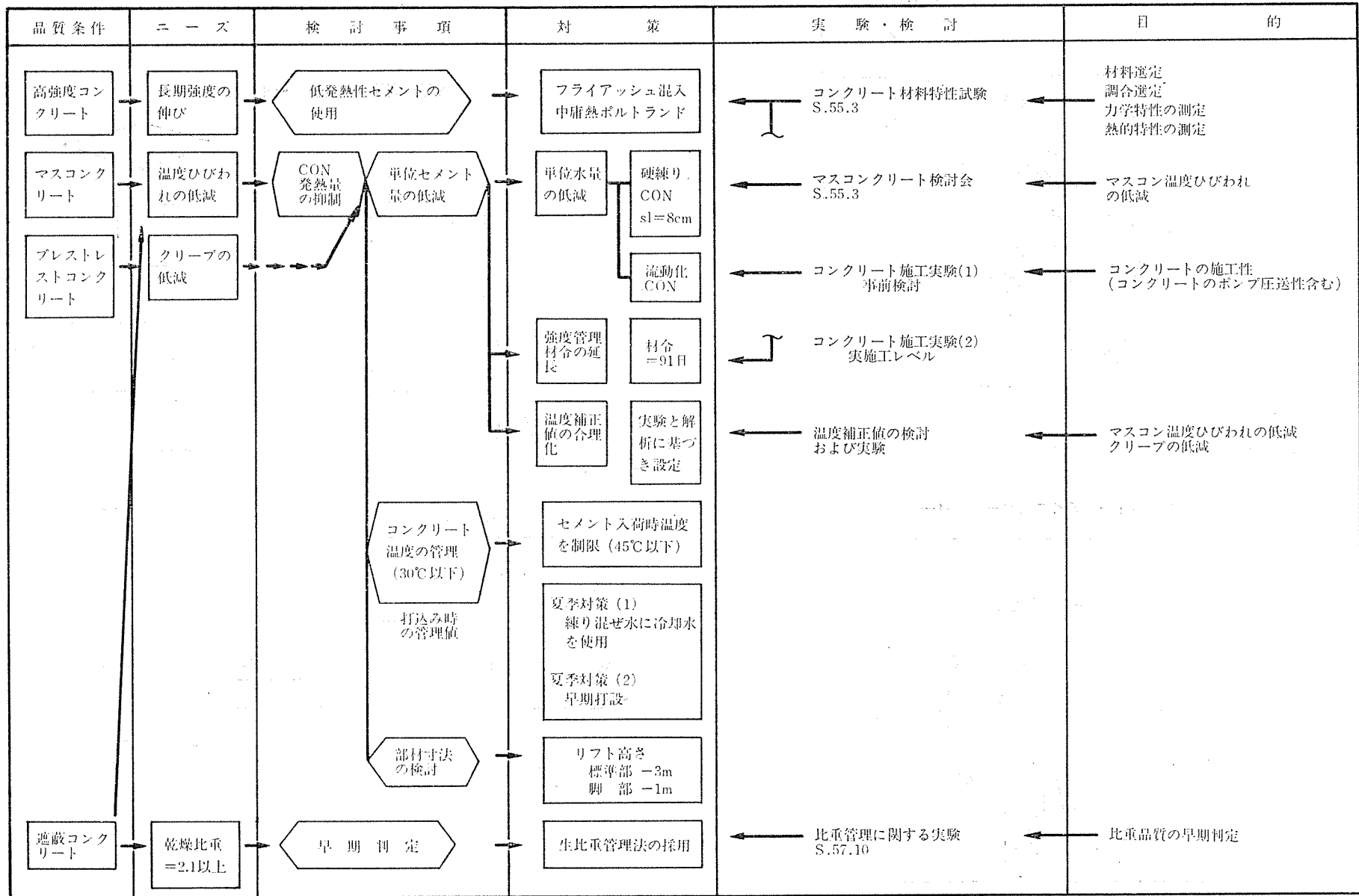


図-16 調合計画上の検討

構造物に比べて、構造安全性の面から高強度が、また機能上からは高度の遮蔽性能が、特に要求される。

このため、施工に先立って、コンクリート諸材料の選定や、調合計画・施工計画について、実験を含む多面的な検討を行い、かつ、工事開始後の品質管理も、とりわけ入念に実施した。

ここでは、PCCV（円筒部・ドーム部）コンクリートに関する、事前の検討作業および施工時の品質管理について概要を紹介することとする。

5.1 事前の検討

仕様書では、PCCV コンクリートの品質に関し、以下のような条件が示された；

- 設計基準強度 420 kg/cm²（材令 91 日）
- コンクリートの等級 高級
- 骨材最大寸法 25 mm
- スランプ 8±2.5 cm（一部 12±2.5 cm）

- 空気量 4±1%
- 乾燥比重 2.1 以上

さらに、PCCV の構造上・機能上の特殊性を考慮して、図-16 に全体像を示すような検討作業を行った。これらの検討結果に基づいて決定した使用材料を表-2 に示す。

まず試験室での一次試し練りで、水セメント比・単位

表-2 使用材料一覧

材 料	種 類	備 考
セメント	中庸熟ポルトランド +フライアッシュ	フライアッシュは プレミックス
骨材	細骨材	葉原産砕砂+三國産陸砂
	粗骨材	葉原産碎石
混和剤	AE 減水剤遅延形 流動化剤	ボゾリス No. 8 NP-10
混練水	川 水	

表-3 検査項目（コンクリート）

検査項目	区分 項目	検査頻度			試験方法
		練上がり	荷卸し地点	打込み地点	
まだ固まらない コンクリート	スランプ	3回/日	1回/150 m ³	1回/100 m ³	JIS A 1101
	空気量	同上	同上	同上	JIS A 1128
	単位容積重量	—	—	同上	JIS A 1116
	温度	3回/日	1回/150 m ³	同上	棒状温度計
硬化後のコンクリート	圧縮強度	3回/日	1回/150 m ³	1回/100 m ³	JIS A 1108
	乾燥比重	—	—	1回/月	乾燥炉による方法

表-4 材料検査結果一覧表

材 料	検査項目	数	規格値	平均値	偏差	最大値	最小値	
細骨材	乾燥比重	68	2.5 以上	2.533	0.008	2.56	2.52	
	吸水率 (%)		3.0 以下	1.675	0.176	2.07	1.20	
	単位容積重量 (kg/m ³)		1500 以上	1700.0	19.3	1760	1660	
	実績率 (%)		60 以上	67.1	0.798	69.7	65.2	
	洗い損失 (%)		2.0 以下	1.56	0.255	1.9	0.9	
	粘土塊量 (%)		1.0 以下	0.54	0.146	0.8	0.3	
粗骨材	絶対比重	68	2.5 以上	2.620	0.007	2.63	2.60	
	吸水率 (%)		2.0 以下	0.834	0.148	1.400	0.587	
	単位容積重量 (kg/m ³)		1500 以上	1582.3	19.7	1670	1540	
	洗い損失 (%)		57 以上	60.38	0.745	63.6	58.6	
セメント	比表面積 (cm ² /g)	99	2500 以上	3122.5	39.5	3210	2970	
			70 以下	63.58	1.29	66.7	60.3	
	水和熱 (cal/g)		28 日	83 以下	74.65	1.11	78.2	72.2
			3 日	50 以上	110.6	3.75	102	118
	圧縮強さ (kg/cm ²)		7 日	100 以上	161.4	5.73	174	148
			28 日	230 以上	361.3	6.28	375	345
			91 日	—	498.4	9.59	523	477
フライアッシュ	比表面積 (cm ² /g)	39	2400 以上	3781.0	189.0	4150	3220	
	圧縮強さ比 (%)		28 日	60 以上	81.7	1.97	85	78
			91 日	70 以上	101.8	2.26	107	98
	強熱減量 (%)		5 以下	3.72	0.609	4.8	2.7	
二酸化けい素成分量 (%)	45 以上	51.95	0.743	54.6	50.9			

水量・細骨材率・AE 剤量・比重などについて検討，実機プラントを使つての二次試し練りでは，練混ぜ特性や計画調合コンクリート（表—1 参照）の性状・強度・比重・スランプと空気量の経時変化などを調べた。

比重に関しては，早期判定を目的とした生比重管理方式を採用するため，生比重と乾燥比重の関係を求めた。

冬期の温度補正については，前記のような仕様に対する参考資料がないため，実験を行うとともに，打設リフト毎の 91 日間平均温度をコンピュータ・シミュレーションで設定して，決定した。

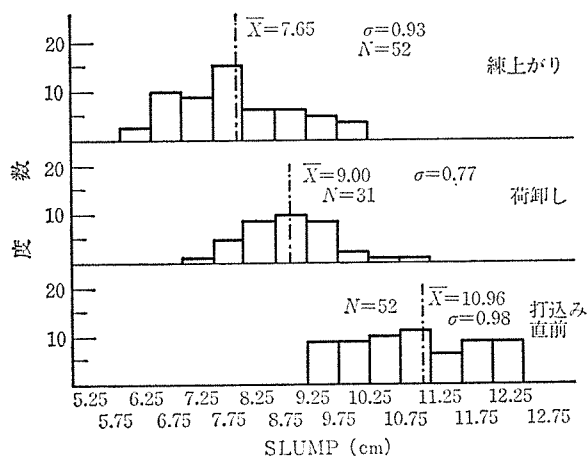
計画調合の施工性（ポンプ圧送性など）についても，工事に先立って数回の実験を行い，確認した。

5.2 品質管理実績

(1) 品質管理項目

品質管理試験は，大別して，

- a. 材料（素材）に関するもの
- b. 計量・製造・運搬設備に関するもの
- c. コンクリートに関するもの



図—17 スランプのヒストグラム（採取地点別）

注) 季節による変動，調査による変動，養生方法による変動が影響なく，採取地点別の相違が判別できるよう春・秋季の調査のみにおいて，分析を行った。

の3種とし，それぞれにつき，定められた施工指針に基づいて，管理試験（検査）項目を定め，コンクリート品質管理要領書を作成，実行に移した。

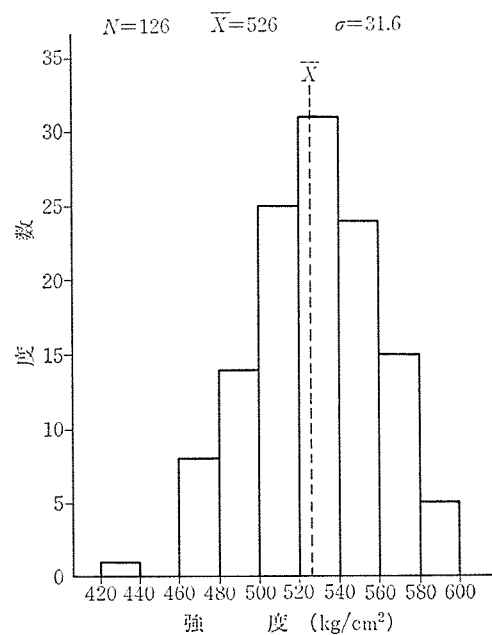
表—3 に，管理試験項目および検査頻度の例として，コンクリートに関するものを掲げる。

(2) 管理試験結果

表—4 は，材料に関する検査の結果一覧である。いずれの材料も，全工期を通じて安定した検査結果を示し，規格値をすべて満足している。

表—5 に，まだ固まらないコンクリートのスランプおよび空気量の試験結果を示す。また，練上がりから打込みまでのスランプの経時変化を，図—17 に示す。

表—6 は，材令 91 日におけるコンクリートの圧縮強度試験結果である。供試体は，打設量 100 m³ 毎に，打込み直前に採取した。この試験データをヒストグラムに表わしたものが 図—18 である。図・表から分かるように，コンクリート強度の分布は合理的であり，その平均



図—18 PCCV コンクリート強度ヒストグラム

表—5 スランプ，空気量試験結果

部 位	調 合	F _c (kg/cm ²)	T (kg/cm ²)	養生方法	スランプ (cm)	空気量 (%)	データ 数	スランプ (cm)		空気量 (%)		備 考
								X̄	σ	X̄	σ	
PCCV	春・秋季	420	—	標準	8	4	52	7.65	0.93	3.39	0.29	打込み時（筒先）のデータ
	夏季		17	8.47			0.72	3.67	0.34			
	冬季		52	8.59			0.86	3.43	0.27			
	練上がり	420	—	標準	11	4.5	52	10.96	0.98	4.90	0.29	採取地点別の比較 春・秋季調査
	荷卸し時		9	4	31	9.00	0.77	4.30	0.30			
	打込み直前		8	4	52	7.65	0.93	3.39	0.29			
テンドン ギャラリ上部 ベースマット	ベースマット全体	420	—	標準	8	4	52	8.18	0.53	3.53	0.24	打込み時

表—6 材令 91 日圧縮強度試験結果

部 位	調 合	F_c (kg/cm ²)	T (kg/cm ²)	養 生 方 法	ス ラ ブ シ ン (cm)	空 気 量 (%)	デ ー タ 数	材令 91 日圧縮強度			備 考
								\bar{X}	σ	V	
PCCV	春・秋季	420	—	標準	8	4	41	553	23.1	4.2	打込み時（筒先）のデータ
	夏季		—	標準			17	530	21.3	4.0	
	冬季		20~50	現水			63	511	25.4	5.0	
	練上がり	420	—	標準	11	4.5	33	509	29.2	5.7	採取地点別の比較 春・秋季調査
	荷卸し時		—	標準	9	4	27	528	30.3	5.7	
	打込み直前		—	標準	8	4	41	553	23.1	4.2	
テンドン ギャラリー上部 ベースマット	ベースマット全体	420	—	標準	8	4	51	504	22.2	4.4	打込み時

注) 養生方法のうち現水とは、材令3週まで標準養生を行い以降現場水中養生とした方法である。

\bar{X} : 平均標 (kg/cm²)

σ : 標準偏差 (kg/cm²)

V : 変動係数 (%)

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100$$

値は、調合強度を充分上回っている。

6. おわりに

PCCV は、欧米ではすでにかんがりの実績を持つ構造物である。しかし、我が国にはまだ、独自の設計条件や、品質上の要求がある。本邦初の PCCV 施工に際して、内外の数多くのデータ・資料は、もとより積極的に参考にはしたものの、新たに解決を求められる問題にも、全工期を通じしばしば遭遇した。

その都度、JV 工事事務所では、関係者の衆知を集め、

また、各方面の先生方のご指導を仰ぐなどして、入念な検討と試行を繰り返し、一つ一つ解決していった。その結果、要求品質を充分満たす PCCV が、予定内の工期で、無事完成した（61 年 1 月、躯体工事完了）。

謝辞：本稿をまとめるに当たり、ご協力を頂いた皆様、特に日本原子力発電（株）敦賀建設所・河合郁郎氏および（株）大林組原子力本部・榎本弘之氏に深く感謝いたします。