

【報 告】

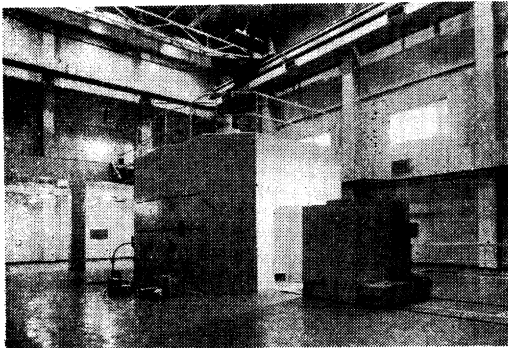
重コンクリートについて

— 日本原子力研究所第一号原子炉
— に対する重コンクリートの施工 —

石 川 六 郎*

まえがき 茨城県東海村に建設中の日本原子力研究所の第一号炉としての WB (ウォーター ボイラー) 型実験原子炉 (JRR-1) において生物遮蔽体として重コンクリートを打設したので、重コンクリートについてその遮蔽体としての意義を述べるとともに重骨材 (磁鉄鉱) の破砕、重コンクリートの混合、打設等の実施記録を報告する。

写真—1



1. 重コンクリート

重コンクリートは High Density Concrete, あるいは Heavy Concrete といわれているが、要するにコンクリートの比重が、従来のコンクリートの比重より大きいコンクリートのことである。

すなわちその骨材に比重の大きい材料を使用して、原子炉から出てくる放射線を、普通コンクリートを使用するより薄い壁厚で、人体に無害なまでに弱めるというためのものである。

2. 遮蔽と重コンクリート

A) 原子炉の炉心を囲む反射体より洩れてくる放射線は α 粒子, β 粒子, γ 線, いろいろなエネルギーの中性子, 核分裂片, 陽子等であるが、遮蔽体だけを問題とした場合は、これらの中で特に透過力の強い γ 線と中性子だけを考えればよい。遮蔽ということの理論的な問題点は次のごときものである。

(1) 速い中性子の減速

(2) 減速された中性子, または, もともと遅い中性子の捕獲

(3) 炉心からの γ 線, あるいは遮蔽体の原子核と, 速い中性子やおそい中性子との相互作用によつて生ずる非弾性散乱 γ 線や, 捕獲 γ 線などのあらゆる型の γ 線の吸収

B) A) の目的にあわせて, 重コンクリートに使用する材料をその遮蔽効果により分類する。

(1) γ 線を吸収するとともにまた非弾性散乱により, 非常に速い中性子を 0.5 Mev (Million electron volt) 程度まで減速させるための重い材料: これにはまず鉄があるが現在まで米国その他で実用あるいは実験しているのは, 磁鉄鉱 (Magnetite), 褐鉄鉱 (Limonite), 針鉄鉱 (Goethite), 重晶石 (Barite or Baryte) あるいは打貫鉄片 (Steel Punching) であり, これらを単独あるいは混合して用いている。鉛は加工も容易で密度も高いので, 遮蔽体の一部としては考えられるが, 一方軟かいことと融点が比較的低いため難点もあり, 重コンクリート用としては使われていない。

(2) 約 0.5 Mev 以下のエネルギーをもつた中性子を減速させるための水素原子を多く含んでいる材料: 水素を含む材料の中性子遮蔽に対する価値は水素の含有量, すなわち単位体積あたりの水素原子の数できまる。コンクリート中に含まれる水素原子の数は, 同体積の水の中に含まれる水素原子の濃度すなわち $6.7 \times 10^{23}/\text{cm}^3$ よりかなり小さく, $1 \sim 1.4 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ 程度であるが, その差はコンクリート中に含まれる酸素 (付加的減速物質となる) の割合がより多いこと, カルシウムや珪素を含んでいることにより, ほとんど同一効果をあげうる。

(3) 高エネルギーの γ 線を放出しないで, 中性子を吸収する材料: この材料は硼素を含む材料といつてもよいくらいであり, ボラル (Boral) — 炭化硼素 B_2C とアルミニウムの複合体 — とかボラックス (Boraxal) — 硼酸 B_2O_3 とアルミニウム — というものが考えられる。東海村で使用したのは, ボロカルサイト (Borocalcite) という白色の粉末体 (英国より輸入) であり, B_2O_3 を 42.3% 含んでいる。

NAA (ノースアメリカン航空会社) より示してきたコールマナイト (Colmanite) は B_2O_3 を 30% 以上と仕様している。

C) 上記の諸材料を使用して製造する重コンクリート

* 正員 鹿島建設KK常務取締役, 原子力室長

に対しての施工上の要求は次のとおりである。

(1) 所定の密度を持つていること：これは実際上問題になるエネルギーの範囲の r 線では、吸収はほとんど遮蔽材料の質量できまり、 r 線を一定の割合で吸収するのに必要な遮蔽体の厚さは、“遮蔽材料の密度に反比例する”といえるから、密度を一定の限度より大にしなければ、設計厚に変更をきたすことになるからである。

(2) コンクリートの均質性が高いこと：コンクリートがその遮蔽効果をあげる上から、全断面にわたって均質でなくてはならないことは当然であり、重骨材を使用するので施工上特に注意を要する。

註：この均質度の調査に当社技術研究所ではラジオアイソトープ、コバルト 60 を使用測定して効果をあげている。

(3) コンクリートの硬化乾燥による容積変化が小さくてキレツを生じないこと。

(4) コンクリートの打上り精度の高いこと（後述型ワク参照）。

3. JRR-1 の重コンクリート

図-1.2 に重コンクリート打設部分を示す。

図中の No. 1, No. 2, No. 3 は重コンクリートの配合の別であり、以下順をおつて報告する。

4. 骨 材

A) NAA よりの仕様

磁鉄鉱

- a) 平均比重 4.6 以上
- b) 鉄分 64%以上
- c) 粒度 表-1 の粒度範囲にあること

鉄片

表-1 NAA 仕様

ふるいの寸法	通過量 % (重量比)		
	粗	中	細
a) 公称			
粒大 3/4 in (19.52 mm)			
76.2 mm (3 in)	100		
38.1 (1-1/2 in)	95~100	100	
19.1 (3/4 in)	0~ 10	90~100	
9.52 (3/8 in)	0~ 3	25~ 50	100
4.76		0~ 10	90~100
2.38		0~ 3	70~ 90
1.19			45~ 75
0.59			25~ 50
0.297			10~ 25
0.149			2~ 10
0.074			0~ 5
b) 油グ			

リース等の有機不純物を含まぬこと。

- c) 浮さび、ごみ、微粉などはふるいわけること。

コールマナイト

- a) No. 8 ふるい通過率 90% 以上, No.30 ふるい通過率 2% 以下

図-1

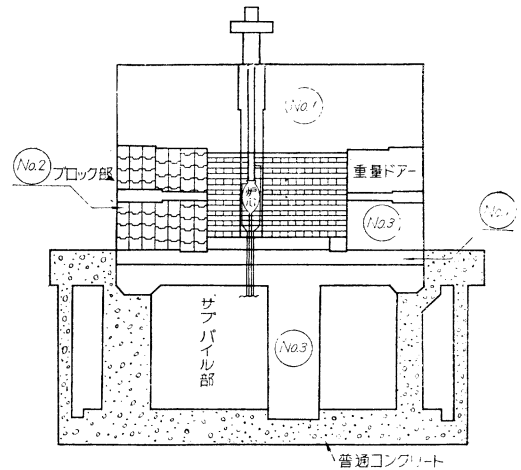
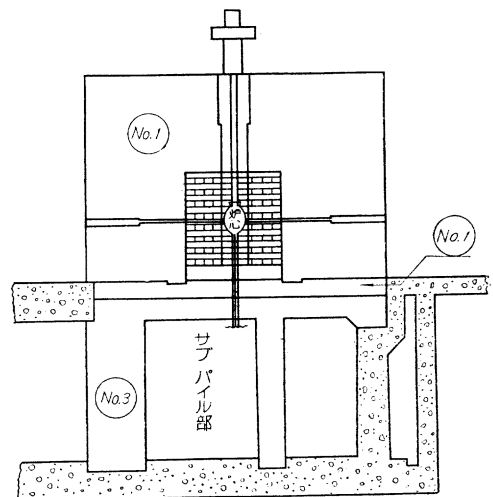


図-2



- b) B₂O₃ の含有率 30% 以上。

B) 東海村での使用骨材 (磁鉄鉱)

(1) 上記仕様書に合格する磁鉄鉱として次のものが採用された。

産地 岡山県金平鉱山

比重 4.79

鉄含有量 67%以上

(2) 破碎試験：東海村における現場破碎にききたち、インペラブレーカー SAP-3 を用いて試験をした結果次のことが確認された。

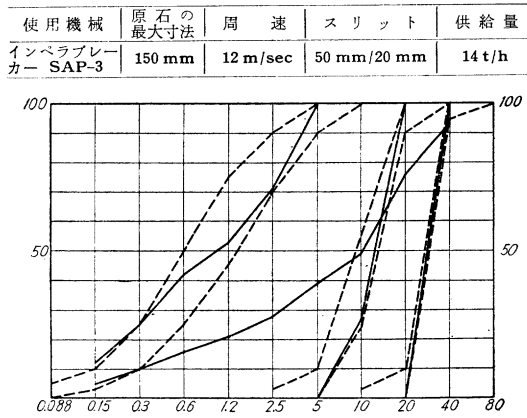
a) インペラブレーカーの周速 12 m の場合は、スリットを 50 mm/20 mm と 60 mm/30 mm とかえてみたが、そのふるい分け百分率はほとんど変化なく、粗中細の各量の百分率は、17~18%、38~37%、39% という結果で粗が不足すること。

b) 周速 25m/sec の場合は、スリット 30mm/15 mm にて粗中細は <4%、30%、66%となり細を生産

表-2

ふるい目の大きさ (mm)	12 m/sec				12 m/sec			
	50 mm/20 mm				60 mm/30 mm			
	通過百分率				通過百分率			
40	94	100			94	100		
20	76	0	100		77	0	100	
10	49		27		51		32	
5	39		0	100	39		0	100
2.5	28			71	29			76
1.2	21			53	23			60
0.6	16			42	16			40
0.3	10			25	10			26
0.15	5			12	5			12
0.075								
F.M.				2.97				2.86

図-3



するにはこの程度が効果的であること。

c) 以上試験の際、供給量を 14 t/h 16+, 18+ とかえたが特別な傾向はみられない。

(3) 破砕の方針:

a) 原鉱総量が 400 t 程度であるため、経済的理由によりクラッシングプラントはできるだけ小規模であること。

インペラブレイカー SAP-3 型(横山工業) 1 基
バイブレーションスクリーン 10 型(ラサ工業) 1 基

b) 原鉱量に余裕がなく(高価であるため)粗中細の各量の比率が配合比(約 3:3:4, 後述)と一致するように破砕すること。

一次破砕でできるだけ荒く破砕して粗骨材が 30% 以上になるようにし、2 次、3 次破砕にて中細の量を調整する。

(4) 破砕:

a) 一次破砕は予備試験の結果よりみて下記の条件が上記の方針にそうことが予想された。

インペラブレイカーの周速 9 m/sec

インペラブレイカーのスリット間隔 40 mm/25 mm
磁鉄鉱の供給量 12 t/h
" 原鉱の最大寸法 150 mm

図-4 は 16 回行つ

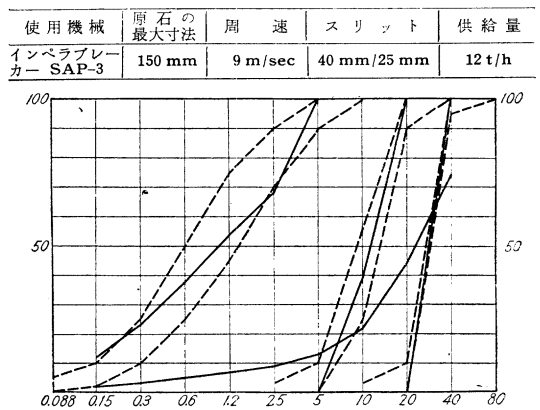
た粒度試験の平均である。粗の量は期待どおり 30%, 中が 31% であつたが、細が 13% といちじるしく小量で 40 mm 以上が 26% もでた。

b) 二次破砕は一次破砕で細がいちじるしく不足したが一次破砕で 40 mm ふるいに

表-3

ふるい目の大きさ (mm)	通過百分率			
	全試料	粗	中	細
40	74	100		
20	44	0	100	
10	22		29	
5	13		0	100
2.5	9			69
1.2	7			54
0.6	5			38
0.3	3			23
0.15	2			12
0.075				
F.M.				3.04

図-4



とどまつたものを再度破砕した。

インペラブレイカーの周速 27 m/sec
" スリット間隔 15 mm/5 mm
磁鉄鉱の供給量 12 t/h

図-5 は二次破砕の粒度試験の傾向を表わす粗中細の割合は 0:15:85 であつた。

c) 三次破砕は骨材の消費とにらみあわせつつ二次破砕と同一条件で破砕して細骨材の補充をした。

C) 使用骨材(鉄片) No. 2 配合すなわちコンクリートブ

ロック部に鉄片を使用した。鉄片の使用は上記 NAA 仕様に準拠をしたがボンドが問題となり、わざわざサビをつけるということもいわれている。

表-4

ふるい目の大きさ (mm)	通過百分率			
	全試料	粗	中	細
40				
20	96		100	
10	83		57	
5	66		0	100
2.5	52			79
1.2	42			64
0.6	29			44
0.3	19			29
0.15	9			13
0.075				
F.M.				2.71

図-5

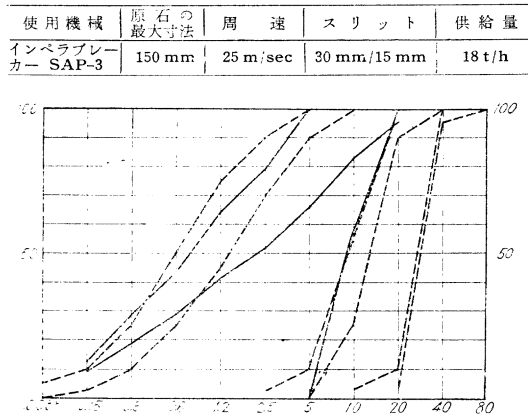
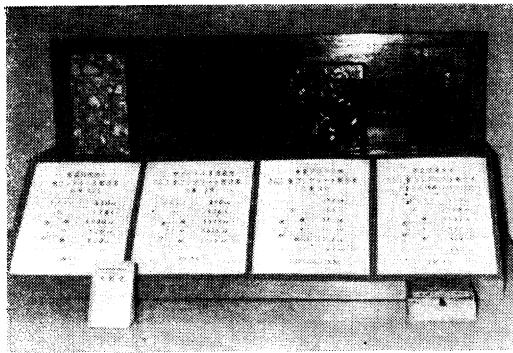


写真-2



5. セメント

NAAの仕様は ASTM-C 150 の Type II の規定に合格することとしているが、原子力研究所の仕様は中熟熱ボルトランドセメントを指定しており、アサノマスコシセメントを使用した。

6. 配合・比重・強度

a) NAA よりの仕様配合 (表-5.6)

b) 建設省建築研究所の推奨配合: この配合はNAAの配合に対して次の疑問点を解決をするため実験推奨されたものである (表-7.8)。

- (1) 水量は有効水量か全水量か、あるいは空気中乾燥骨材に対する加水量か
- (2) 骨材の比重は見掛比重か
- (3) 骨材の重量の基準乾燥状態

c) 現場打設記録: 建設省建築技術研究所の推奨配合をもととして、かつ打設時の温度と強度を考慮して実施配合はセメント 10% を増した (表-9.10)。

表-5

1. NAA 仕様書中の磁鉄鉱コンクリートの配合規定 (その1)

配合番号	重量配合比 (%)						比重	水セメント比 (0/wt)	
	セメント	水*	磁鉄鉱			コールドマナイト			鉄片
			粗	中	細				
No.1	9.3	5.4	26.8	26.8	26.8	4.9	—	3.5	58.1
No.2	9.5	5.5	—	22.6	35.9	4.7	21.8	3.7	57.9
No.3	8.2	5.1	28.9	28.9	28.9	—	—	3.7	62.2

* スランプ 2" となるように定める。

表-6

2. NAA 仕様書中の磁鉄鉱コンクリートの配合表 (その2)

配合番号	材量使用量 lb/cu.yd (カッコ内は kg/cu.m.)							
	セメント	水	磁鉄鉱			コールドマナイト	鉄片	計
			粗	中	細			
No.1	560 (332)	325 (193)	1615 (958)	1615 (958)	1615 (958)	300 (178)	—	6030 (3578)
No.2	610 (362)	350 (208)	—	1450 (860)	2300 (1364)	300 (178)	1400 (831)	6410 (3803)
No.3	520 (309)	325 (193)	1835 (1088)	1835 (1088)	1835 (1088)	—	—	6350 (3767)

表-7 建設省建築研究所推奨配合および最低強度

配合番号	スランプの範囲 (cm)	水量 (kg)	セメント量 (kg)	水セメント比 (%)	細骨材量 (kg)	ボロカルサイト量 (kg)	組骨材量 (kg)	
							5~20 mm	20~40 mm
1	5>	155	332	46.7	1325	144	928	928
2	5>	160	320	50.0	1372	—	1050	1050

圧縮強度 (kg/cm ²)		
3日	7日	28日
110	220	370

表-8 配合設計に使用した数値

	比	吸水量	実積率	現場重量計量	摘要
	重	(0/wt)	(0/vl)	(kg/l)	
セメント	3.2	—	—	—	
金平磁鉄鉱	5 mm 以下	4.70	0.7	—	20~5 mm, 40~20 mm を等重量混じらもつ
	40~5 mm	4.80	0.3	60	
ボロカルサイト	2.40	0	—	1.30	

* 20~5 mm, 2.65 kg/l, 20~40 mm 2.70 kg/l

表-9 現場打設記録

第1回
 日時 昭和31年12月16日 午前10時~午後4時
 (途中1時間休憩)
 打設場所 サブバイル壁部 打設量 12.5 m³

示方配合

配合番号	スランプの範囲 (cm)	水量 (kg)	セメント量 (kg)	水セメント比 (%)	細骨材量 (kg)	ボロカルサイト量 (kg)	組骨材量 (kg)	
							5~20 mm	20~40 mm
2	5>	167	352	47.5	1377	—	1021	1021

骨材含水量 細骨材 0.3%
 粗骨材 0.1%

スラブおよび比重測定値

No.	スラブ (cm)	比 重			備 考
		10マス	モールド		
1	2.1	3.79	—		室温 3.5°C 水温 (タンク) 16°C
3	3.7	3.76	3.86	3.82 3.84	
4	6.2	3.83	—		テストピース 3本 室温 6°C
7	5.0	3.80	3.85	3.86 3.86	テストピース 3本
14	5.0	—	3.84	3.82 3.82	室温 4°C

養生温度, 夜間の養生温度 max 11°C
min 7°C
強度試験 採取 31.12.26 試験 31.12.29
材令 3日 平均 164 kg/cm² (蒸気養生 max 26°C)

表-10 現場打設記録

第1回
日時 昭和31年12月29日 午前11時~午後3時
(途中1時間休憩)
打設カ所 スラブ 打設量 10.5 m³

示方配合

配合 番号	ス ラ ブ (cm)	水 量 (kg)	セメ ン ト 量 (kg)	水セメ ン ト 比 (%)	細骨材 量 (kg)	ポロカ ルサイ ト量 (kg)	粗 骨 材 量 (kg)	
							5~20mm	20~40 mm
2	3	166	350	47.4	1422	—	1010	1010

骨材含水量 細骨材 0.4%
粗骨材 0.1%
スラブ 2.1~3.4 cm 比重 3.78~3.91

表-11 現場打設記録

第3回
日時 昭和32年1月10日
打設カ所 スラブ上端 打設量 6 m³

示方配合

配合 番号	ス ラ ブ (cm)	水 量 (kg)	セメ ン ト 量 (kg)	水セメ ン ト 比 (%)	細骨材 量 (kg)	ポロカ ルサイ ト量 (kg)	粗 骨 材 量 (kg)	
							5~20mm	20~40 mm
1	3	166	333	49.9	1345	145	932	932

骨材含水量 細骨材 0.3%
粗骨材 0.1%
スラブ 1.6~3.9 cm 比重 3.70~3.77

表-12 現場打設記録

第4回
日時 昭和32年2月12日~13日
打設カ所 屋上部遮蔽 打設量 33 m³

示方配合

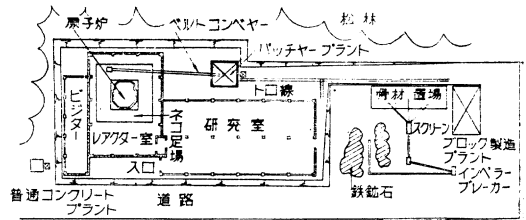
配合 番号	ス ラ ブ (cm)	水 量 (kg)	セメ ン ト 量 (kg)	水セメ ン ト 比 (%)	細骨材 量 (kg)	ポロカ ルサイ ト量 (kg)	粗 骨 材 量 (kg)	
							5~20mm	20~40 mm
1	3	169	333	50.8	1339	148	934	934

骨材含水量 細骨材 0.9%
粗骨材(中) 0.2%
(大) 0.1%
スラブ 2.7~3.8 cm 比重 3.67~3.77
強度 材令3日(蒸気養生 28°~30°C) 平均 161 kg/cm²

7. 現場施工計画

重コンクリートを施工するためのプラントの配置を、
図-6に示す。

図-6 JRR-1 施工計画



8. バッチャープラント

名 称: 半自動式バッチャープラント
公称能力: 20 m³/h
ミキサー: 21 切油圧傾動式(スミス式, フロントエン
ド型) 2台
骨材ホッパー: 10 m³ (見掛量)
コンシステンシーメーター付
仕様書の計量誤差はセメントおよび水各1%, 骨材2%
以内である。

バッチャープラントの設計機能上の問題として次の
ことがこれからの研究課題である。

- (1) 骨材計量ピンの開閉がより強力であること、
あるいはその形式の改良。
- (2) ミキサーの型式(混合能力の問題)
- (3) ミキサーよりの排出(分離の問題)

9. 型ワケ

原子炉まわりに配管および中性子実験孔などが多数あ

写真-3

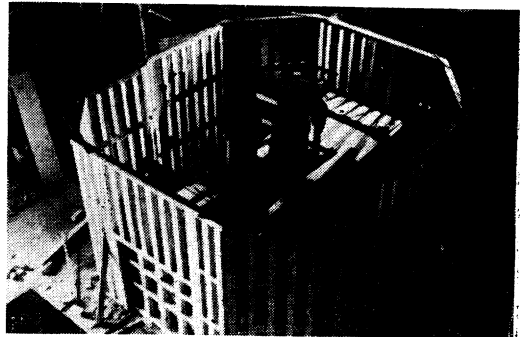
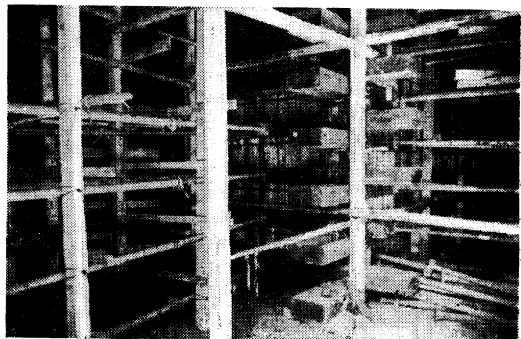


写真-4



り、それがいづれもセキ板を貫通しないで接しているのので、型ワクの誤差が1/16" という機械的数字に規定され、しかもホームタイの使用が許されないので、組立並びに取付に苦心をした。板は厚さ6分の耐水合板、縦バタ角は、十分角カンナ仕上げを、横バタ角

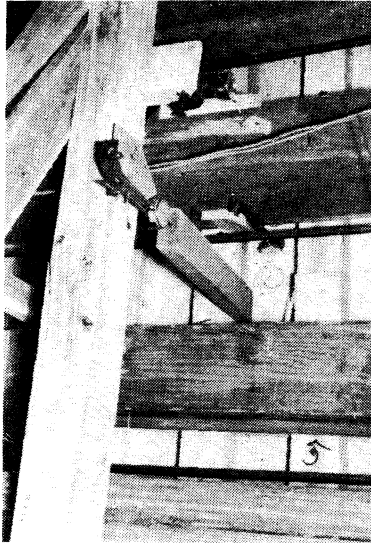


写真-5

は5寸×1尺角を高さ12尺の部分に8段に入れ、建家の壁よりパイプサポートにて突張り、誤差を最少限にした。型ワクの足元はあらかじめ床のコンクリートを打込むとき埋込んでおいたアンゲルに固定した。

打込みの場合は、1/100mmの精度のダイヤルゲージで型ワクの変位を測定し(写真-5)、盤圧計の読みもダイナミックストレインメーターと、ペン書きオシロスコープにより自記させて、型ワクにかかる圧力を求めた。最大変位1.5mmコンクリート圧2t/m²であつた。

註：1/100mm精度のダイヤルゲージで、型ワクの変位を測定した。

10. 練り混ぜ

A) 練り混ぜ時間

すべての材料投入後3分、ただしボロカルサイトは水に溶けやすく、溶けると酸性になってセメントに影響をおよぼすので2分後に投入1分以内の練り混ぜを行う。

B) 練り混ぜ量

21切ミキサーにて1バッチ12切で大体良好であつた。

11. 運搬

運搬上の問題は分離である。当初バケツで打込む予定であつたが、配管類に衝撃をあたえるおそれがあるので、一般に分離を起しやすくと考えられているコンベヤー運搬を行った。プラントよりコーンケーブル型コンベヤーで炉上面まで運びあげ、ホッパー、ネコ車で運搬したが、特にモルタルがホッパーで分離したりすることもなく良好な結果がえられた。

12. 打ちこみ

亀の子ホッパー(写真-6)でうけてのち、ホッパー付

写真-6 ホッパー付
ゴムシュート

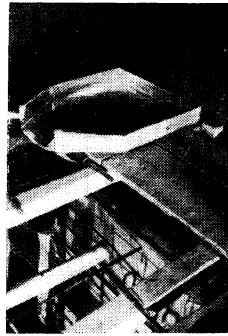
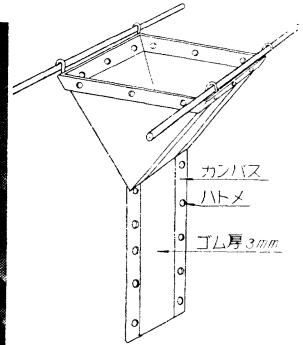


図-7



ゴムシュート(図-7)に少しずつおとして打ちこんだ。

A) 建設省建築研究所の研究により重コンクリート(比重3.7~3.8)の打ちこみ落差は1.5m以上であると分離が急激に大きくなるので、種々考案の結果上記ゴムシュートを製作使用した。これは常時は図-7のようにたいらであり、重コンクリートが押しひろげて落下する際(円くならないようにシュートの途中交互にあて板をしてある)に速度を減ずるとともに分離を防ぎ、かつフレキシブルであり多少のふりまわしもきき、特に内部の複雑な構造に対し安全かつ効果的であつた。なおホッパー付シュートをできるだけ多く移動することが必要であることは当然である。

B) コンクリートの打継目は放射線と直角方向にバタ角を沈め、15時間後取除いて十分にワイヤーブラシで打継面をこすり、レイタンス等を除去したのち、重モルタルをブラシですりこんだ。この重モルタルはセメントと細骨材(磁鉄鉱の細骨材で0.3mmのふるいを通したものを)を1:1で混合し、水で極度にうすめたもので、むしろ濁水といったものであり、これはモルタル層における遮蔽上の弱点を生ぜしめないためである。

C) 打込み速度は大体1時間4~5m³であつた。

バイブレーターはミカサSM-45(公称回転12000rpm)を使用した。

13. むすび

重コンクリートの研究は日本ではまだこれからのことといつてよいくらいであるが、問題はいかなる重骨材が廉価で、また大量に得られるかということに集約されてくるので、これからの大型動力炉の遮蔽用コンクリートに対する結論をだすのは、なかなか困難なことである。当社では昭和31年度原子力平和利用研究補助金をうけて、「放射線遮蔽用コンクリートの現場施工に関する研究」を実施しており、いずれ発表の機会をもちたいと思つている。