

J A E R I - M  
90-205

JPDR生体遮蔽コンクリートの材料強度特性

1990年11月

出井 義男・鎌田 裕・坪 陽一・鬼沢 邦雄  
中島 伸也・助川 武則・柿崎 正義\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 株原子力資料サービス

## J P D R 生体遮蔽コンクリートの材料強度特性

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

出井 義男・鎌田 裕・坪 陽一・鬼沢 邦雄  
中島 伸也・助川 武則<sup>+</sup>・柿崎 正義\*

(1990年10月24日受理)

軽水型発電炉の寿命を決定する要因の一つとして、交換が事実上不可能または交換に多額の費用を要する機器・構造物の劣化・損傷が挙げられる。具体的には、原子炉圧力容器やコンクリート構造物、電線等がそれに該当する。

わが国で最初に原子力発電を行った J P D R は現在解体が進められており、著者らはその生体遮蔽コンクリートを利用した経年変化に関する調査を実施した。調査内容は、ボーリングによりコアを採取した後、供試体による圧縮強度等を中心とした強度試験とした。

その結果、以下の点が明らかとなった。

- ①コンクリートは、大型商用炉の寿命末期の照射量に相当する最大  $1 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$  の高速中性子の照射を受けている。
- ②圧縮強度は、建設時の調合設計強度を平均して20%以上上回った。
- ③本試験で対象とした照射範囲では、中性子照射量の増加に伴い圧縮強度は僅かに上昇する傾向を示している。
- ④割裂引張り強度、ヤング係数及びポアソン比に関しては、圧縮強度試験で確認されたような有意の変化は認められなかった。
- ⑤内側ライナー及び中継ぎライナーがコンクリート内の水分保持に有効に作用し、強度低下の防止に寄与していると推定される。

---

本研究は、日本原子力研究所と鹿島建設株式会社との共同研究の成果である。

東海研究所 : 〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根 2-4

+ 動力試験炉部

\* 鹿島建設(株)

Mechanical Properties of JPDR Biological Shield Concrete

Yoshio IDEI, Hiroshi KAMATA, Youichi AKUTSU  
Kunio ONIZAWA, Nobuya NAKAJIMA, Takenori SUKEGAWA<sup>+</sup>  
and Masayoshi KAKIZAKI\*

Department of Reactor Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 24, 1990)

Plant life of nuclear power plant will be determined by the aging degradation of main components and structures because of the difficulty and the cost of the replacement. These components are the reactor pressure vessel, concrete structures and cables.

Authors have performed the investigation of JPDR biological shield which was succeeded in first generating electricity in Japan and is now being decommissioned in JAERI. The test core samples were bored from the shield concrete and tested to obtain the mechanical properties. Test results are summarized as below,

- (1) Peak value of fast neutron dose was estimated as  $1 \times 10^{18}$  n/cm<sup>2</sup> which is equivalent to the dose at the end of life for commercial power reactor.
- (2) Averaged compressive strength of all specimens had been increased about 20% compared with initial design strength.
- (3) It was identified that the compressive strength had a little trend to increase with the increase of neutron dose within the dose range obtained in this study.

---

This study was conducted by cooperation between JAERI and  
KAJIMA Corporation  
+ Department of JPDR  
\* KAJIMA Corporation.

- (4) Tensile strength, Elastic modulus and Poisson's ratio showed little effect of neutron dose.
- (5) It was suggested that the inside and the mid-section liners were effective to keep the water in concrete and to avoid the reduction in strength.

Keywords: Biological Shield Concrete, Neutron Dose, Gamma-ray Dose, Compressive Strength, Tensile Strength, Elastic Modulus, Poisson's Ratio

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. J P D R の生体遮蔽コンクリートの概要 .....	3
2.1 全体構造 .....	3
2.2 热 設 計 .....	3
2.3 生体遮蔽コンクリートの施工記録 .....	4
2.4 生体遮蔽コンクリートの環境条件 .....	5
2.5 J P D R の原子炉運転履歴 .....	5
3. 解析及び試験方法 .....	18
3.1 放射線照射量及び温度分布計算 .....	18
3.2 コンクリートコアの採取 .....	18
3.3 コンクリート供試体の製作 .....	19
3.4 材料強度測定方法 .....	19
3.5 シュミットハンマー法による非破壊試験 .....	21
4. 結果及び考察 .....	28
4.1 放射線照射量及び発熱量 .....	28
4.2 圧縮強度, ヤング係数及びボアソン比 .....	30
4.3 割裂引張り強度 .....	33
4.4 シュミットハンマーによる強度試験 .....	33
5. ま と め .....	60
謝 辞 .....	61
参考文献 .....	61

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Description of JPDR Biological Shield Concrete .....	3
2.1 Outline .....	3
2.2 Thermal Design .....	3
2.3 Construction Information .....	4
2.4 Circumferential Condition .....	5
2.5 Operating History .....	5
3. Analysis and Experimental Procedure .....	18
3.1 Calculation of Radiation Dose and Heat Generation .....	18
3.2 Sampling by Core Boring .....	18
3.3 Preparation of Concrete Specimen .....	19
3.4 Mechanical Properties Test .....	19
3.5 Nondestructive Test by Schmidt-hammer .....	21
4. Results and Discussion .....	28
4.1 Radiation Dose and Temperature Gradient .....	28
4.2 Compressive Strength, Elastic Modulus and Poisson's Ratio .....	30
4.3 Tensile Strength .....	33
4.4 Compressive Strength by Schmidt-hammer .....	33
5. Conclusion .....	60
Acknowledgement .....	61
References .....	61

## 1. 緒 言

我が国の原子力発電は、1963年の日本原子力研究所の動力試験炉（Japan Power Demonstration Reactor: J P D R）の初発電以来27年が経過している。この間、国内の軽水型発電炉は建設中を含めると総数で50基になり、そのうち現在37基が運転されている。これらの軽水型発電炉の設計寿命は30年ないし40年と言われている。

一方、原子力発電炉の実質的な運転寿命を考えるとき、設計、使用材料、施工、運転管理などが個々の発電炉で異なっており、単一的な指標で寿命を規定することは困難であろう。従って、発電炉の運転寿命は一義的に定められず、個々の発電炉の劣化状況に即した寿命予測技術に基づき、さらに安全裕度を考慮のうえ決められる必要がある。そのことは、結果的に発電炉の運転寿命の延長に対する期待にも応えることになる。すなわち、寿命予測技術を基本にして寿命を評価することは、原子力発電炉の安全性向上に寄与するのみならず、寿命の延長による経済性の向上や省資源の効果、放射性廃棄物の総発生量の低減化などにも寄与することが期待でき、さらに、長寿命化のために必要な対策も明らかにすることができると考えられる。

寿命予測のための技術基盤の整備には10年程度が必要と考えられ、1960年代に完成した初期の軽水型発電炉の運転寿命の評価が必要となる時期までに、寿命予測技術を確立しておくことが求められる。

軽水型発電炉の各機器・構造物のうち、交換が不可能あるいは交換に多大な費用を要する機器は、発電炉の工学的寿命を事実上決定することになる。これらの機器・構造物としては、原子炉圧力容器、コンクリート構造物、電線などがあげられる。これらの中で、原子炉圧力容器については、原子力固有の経年変化現象である中性子照射脆化、あるいはき裂成長挙動等の観点から幅広い研究が展開されている。また、電線に関しても同様に放射線場の経年変化現象等について促進劣化法等に関する研究が展開されている。コンクリート構造物についての原子力固有の経年変化現象である放射線照射に伴う材料特性の劣化に関する研究は、主として一定の大きさの試料による高中性子束または高ガンマ線束下での照射、いわゆる加速法による照射試験に限られ、また、得られているデータも少ない。そのため、実際の軽水炉運転時の条件下で、長期間にわたって放射線照射を受けたコンクリートの劣化現象については不明な点も多く、原子力の分野でコンクリート構造物の長期利用を考える際には、この点からの試験研究が必要となる。このことは軽水型発電炉のみならず、将来的には処理処分施設、核融合施設の設計研究等にも有用となろう。

そこで、現在解体中のJ P D Rを利用し、生体遮蔽コンクリートについての経年変化に関する調査を実施した。

J P D Rは原子炉熱出力45MW（J P-IIへの改造後90MW）の軽水型小型発電炉であり、建設後すでに27年を経過し、この間に957日（約1.22年の全出力運転相当）の運転実績を有している。運転時間としては少ないものの、小型炉のため生体遮蔽コ

ンクリートの放射線照射量は実質的に多く、大型発電炉の寿命末期に相当する放射線照射量を受けていると考えられる。また、J P D R の生体遮蔽コンクリートは、その構造から放射線遮蔽の役割だけでなく原子炉圧力容器を支持する構造物の役割も有している。

本件の調査では、生体遮蔽コンクリートからコア試料を採取し、各種の材料特性評価を行った。本報告では、その中の圧縮強度を中心とした強度試験結果について報告する。なお、化学組成分析等ミクロ的な調査に関しては別途報告することとする。

## 2. J P D R の生体遮蔽コンクリートの概要

### 2. 1 全体構造

生体遮蔽コンクリートは原子炉格納容器建家の中心からタービン建家側へ1mずれた位置にその中心を有しており、基礎底盤から3階床まで連続して立上がる鉄筋コンクリート構造物である。その形状は内部に直径2.7～3.5mの円筒上の空間を有し、その空間を囲む壁の厚さは遮蔽要求などから1.1～3.0mの間で変化しており、生体遮蔽コンクリートを含む原子炉建屋全体として複雑な構造物となっている。

また、生体遮蔽コンクリートの細部を見ると、内表面には厚さ13mmの鋼製のライナーが内張りされ、内外表面の中間に中継ぎライナーが配置され、外表面にはエポキシ系の塗装が施されている。また、その内部の内表面に近い部位にはガンマ線発熱による温度上昇を抑えるため、多数の冷却配管（1B, Sch 40、STPG-38相当品）及び7本の炉外中性子モニター用のガイドチューブ（6B及び4B、Sch 40、STPG-38相当品）などが内蔵されている。

生体遮蔽コンクリートの形状（原子炉格納容器建家の各階平面図及び断面図）及び配管配置図を図2. 1及び図2. 2に示す。

### 2. 2 熱設計

生体遮蔽コンクリートは原子炉熱出力90MWの運転時に、次の2つの基準を満足するように熱設計されている。

- ① 生体遮蔽コンクリート内の温度を99°C以下に抑える。
- ② コンクリートのひび割れ発生を防止するため、大きな引張り応力が生じないよう温度勾配を抑える。

一般に生体遮蔽コンクリートの温度は、 $\gamma$ 線による発熱と原子炉圧力容器からの熱輻射による影響が考えられるが、J P D Rの熱設計では熱輻射の効果は考慮されていない。これは原子炉圧力容器に保温材が取付けられ、保温材の表面温度は高くならないためであると推定される。

生体遮蔽コンクリート内の $\gamma$ 線エネルギー束の分布は式(2. 1)で求められている<sup>1)</sup>。

$$\Phi_{\gamma} = 7.9 \times 10^{11} e^{-0.556t} \text{ MeV/cm}^2 \text{s} \quad (2. 1)$$

ここに  $\Phi_{\gamma}$  :  $\gamma$ 線エネルギー束  
 $t$  : 内壁からの距離 (cm)

$\gamma$ 線加熱による生体遮蔽コンクリートの温度上昇を抑えるため、コンクリートを冷却する必要がある。この遮蔽冷却系は前述の熱設計基準を満足する冷却能力が要求される。遮蔽冷却系は次の条件で設計されている。

- ① 原子炉圧力容器と生体遮蔽コンクリート内壁間（アニュラス部）の空気温度を 65.5°C (150°F) とする。
- ② 生体遮蔽コンクリート外側の空気温度を 37.8°C (100°F) とする。
- ③ 遮蔽冷却系配管表面の温度を 51.7°C (125°F) とする。
- ④ 生体遮蔽コンクリート内・外表面からの自然放熱率は式 (2. 2) によるものとする。

$$h = 2.56 \cdot \Delta T^{0.25} \quad (2.2)$$

ここに  $h$  : 自然放熱率 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\Delta T$  : コンクリート壁面及び周囲空気との温度差 (°C)

これらの条件で生体遮蔽コンクリートの温度上昇と温度勾配の基準を満足させるため、内表面から 7.6 cm の位置に、また予備として 30 cm の位置に垂直方向の冷却用配管が配置されている。これらの配管群の円周方向の配置は等間隔でなく、炉心からの放射角で 5~11° の範囲に分布している。これは遮蔽冷却系の配管群と同心円上に炉外中性子モニター用のガイドチューブが配置されているため、それを避けたものと考えられる。

前述の遮蔽冷却系に関する①~④の条件で計算した設計時の遮蔽コンクリート内の温度分布の計算結果を<sup>1)</sup> 図 2. 3 に示す。

## 2. 3 生体遮蔽コンクリートの施工記録

J P D R の生体遮蔽コンクリートは、以下の条件で施工された。

### (1) コンクリート組成

①セメント：普通ポルトランドセメント

日立セメント製、表 2. 1 に試験成績表を示す。

②粗骨材：那珂川 御前山産

③細骨材：現地の掘削砂（海砂）を洗浄して使用

④混和剤：プラスチメント（流動特性改善用）

### (2) 調合設計

調合設計条件及び調合内容を表 2. 2 に示す。

### (3) 鉄筋工事

鉄筋規格：SSD 39 (現在の SD 24相当品)

引張り強度：39~53 kgf/mm<sup>2</sup>

伸 び：18%以上

なお、鉄筋のかぶり厚さは 3 cm 以上確保するものとされている。

#### (4) コンクリートの打設工事

生体遮蔽コンクリートを含む原子炉格納容器内のコンクリート全体の打設区分と打設順序を図2.4に示す。図中の打設番号からも分るように、厚さ3.0 mmの部分は厚さ方向で2分割にして打設されている。原子炉格納容器内コンクリートの打設に要した期間は1962年3月から11月までの約9カ月となっている。

#### 2.4 生体遮蔽コンクリートの環境条件

J P D R の原子炉格納容器内は通常運転時  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$  (燃料交換時は  $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ) の外気を取り入れ換気されている。このため、生体遮蔽コンクリートの外表面側は表面の塗料を介して常に外気に晒される状態に置かれている。外表面側の温度条件は各種運転機器からの放熱、夏期・冬期の冷暖房等により外気温度とは一定の差がある。しかし、外表面側の多くは通常の作業空間に接しているため、人間の居住空間温度とは大きく異なることはない。

生体遮蔽コンクリートの内表面側も  $9.1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$  の外気で換気されている (換気流速:  $1.5 \sim 2.1 \text{ m/s}$ ) が、内表面には厚さ13 mmの鋼板ライナーが取り付けられている。このライナーにより、直接空気と接触することはないが、炉心からの放射線の照射と原子炉圧力容器保温材からの熱輻射とを受ける環境におかれている。

J P D R の運転開始当初、生体遮蔽コンクリート内に埋め込まれた熱電対を用いて、コンクリート内の温度が実測されている<sup>2)</sup>。その測定結果によれば、原子炉熱出力40 MW (J P D R - I の定格熱出力は45 MW) での運転時、運転に伴う温度の上昇は  $10^\circ\text{C}$  程度であることが知られている。この測定結果及び J P D R - II (定格熱出力は90 MW) の設計値から判断し、原子炉の運転に伴う生体遮蔽コンクリート内の温度は、熱設計の解析結果を十分下廻っているものと推定される。なお、生体遮蔽コンクリートの内表面側の運転時のガンマ線線量率は構造上の制約などから実測されていない。

#### 2.5 J P D R の原子炉運転履歴

J P D R - I は1963年8月に初臨界に達した後、10月の初発電以降、J P D R - IIへの出力倍増のための改造工事の始まる1969年9月まで運転を継続した。この運転期間中、各種実験装置の取付け取外し、及び多くのトラブルの発生等のために運転を停止していた期間が長く、断続的な運転が行われた。

J P D R - I の7年間の運転実績は次の通りである。

①原子炉運転時間	14,096時間
②原子炉熱出力量	18,501 MWD
③発電時間	12,236時間
④発電電力量	$1.22 \times 10^8 \text{ KWh}$
⑤定格出力換算運転年数	1.13 EFPY

1969年10月から熱出力を倍増するための改造工事を行い、1972年2月からJ P D R - II の運転を開始し、同年5月に J P D R - II の初発電を行った。その後、出力上

昇のための特性試験の過程で種々のトラブルが相次ぎ、1976年3月をもってJ P D R - IIの運転を終了することとなった。

J P D R - IIの4年間の運転実績は次の通りである。

①原子炉運転時間	3, 014 時間
②原子炉熱出力量	2, 951 MWD
③発電時間	1, 992 時間
④発電電力量	$1.47 \times 10^4$ KWh
⑤定格出力換算運転年数	0.09 EFPY

J P D R - I 及び J P D R - II の運転実績を表2, 3に示す。

表 2.1 試験成績表

## セメント試験成績表

昭和 37 年 10 月 ~ 12 月 No.

## 般 物 試 験

種別	項目	比重	物 来 度	凝				結				安定性	
				比表面積 (88 ミクロン法) (M²/g)	比表面積 (ブレーナン法) (M²/g)	水温 °C	湿度 %	水量 %	始発分	終時分	沸騰法	浸水法	
普通セメントセメント (S.37.10)		3.14	3.270	2.0	20.2	87	26.1	2-35	3-33	良	-		
" "	(S.37.11)	3.15	3.270	2.0	19.8	86	26.1	2-45	3-44	良	-		
" "	(S.37.12)	3.15	3.170	2.1	19.8	86	26.2	2-39	3-37	良	-		

種別	項目	曲強さ kg/cm²	正縮強さ kg/cm²	水槽温度 °C			
				3日	7日	28日	7日
普通セメントセメント (S.37.10)		238	49.5	70.3	125	221	409
" "	(S.37.11)	240	50.6	70.7	132	238	412
" "	(S.37.12)	236	50.2	73.1	128	224	418

## 化 学 成 分

種別	項目	強熱減量 %	不溶残分 %	シリカ %	アルミニナ %	酸化第二鉄 %	酸化カルシウム %	マグネシア %	無水硫酸 %	合計 %	水硬率
普通セメントセメント (S.37.10)		0.5	0.8	21.6	5.2	3.2	65.0	1.3	1.7	99.3	2.13
" "	(S.37.11)	0.5	0.7	22.0	5.3	3.0	64.7	1.3	1.8	99.3	2.09
" "	(S.37.12)	0.7	0.6	21.8	5.3	3.1	64.6	1.5	1.9	99.5	2.10

表2.2 コンクリートの調合設計

## 1) 調合設計条件

項目	設計値
調合強度	250 kgf/cm <sup>2</sup>
水セメント比	48 %
スランプ	7.5 cm

## 2) 材料及び単位量

材料	仕様	単位量
セメント	普通ポルトランド	290 kg/m <sup>3</sup>
粗骨材	那珂川御前山産	1240 kg/m <sup>3</sup>
細骨材	現地砂(海砂水洗い)	653 kg/m <sup>3</sup>
混和材	プラスチメント	セメント量の0.3%
水	那珂川からの採取水	139 kg/m <sup>3</sup>

表 2.3 J P D R 運転実績

区分 項目 年度	原子炉起動回数・熱出力量			発電時間(時:分)	発電電力量(MWh)	備考
	運転日数	運転時間(時:分)	熱出力量(MWD)			
J PDR-I 昭和38年	82	833:58	713.3	365	28	403:50
39	70	1,116:09	929.7	178	27	662:59
40	214	4,532:17	6,427.9	81	8	4,082:57
41	156	3,230:49	4,211.6	122	15	3,034:51
42	135	2,628:34	3,565.9	178	12	2,458:33
43	62	805:41	1,082.6	121	9	692:12
44	52	948:29	1,569.8	69	7	901:04
小計	771	14,095:57	18,500.8	1,114	106	12,236:26
J PDR-II 45	0	0:00	0.0	0	0	0:00
46	21	40:00	0.0	102	9	0:00
47	60	1,092:47	827.01	64	10	617:30
48	0	0:00	0.0	0	0	0:00
49	0	0:00	0.0	0	0	0:00
50	105	1,881:17	2,124.08	58	10	1,374:38
51	0	0:00	0.0	0	0	0:00
52	0	0:00	0.0	0	0	0:00
53	0	0:00	0.0	0	0	0:00
小計	186	3,014:04	2,951.09	224	29	1,992:08
合計	957	17,110:01	21,451.85	1,338	135	14,228:34
						136,957.4

(注) ① 起動回数と停止回数の差異は、運転訓練等のために臨界未臨界操作を繰返したことによるものである。  
 ② 停止回数は通常停止、計画停止、計画外スクラム停止、計画外スクラム停止の合計数である。

JAERI-M 90-205

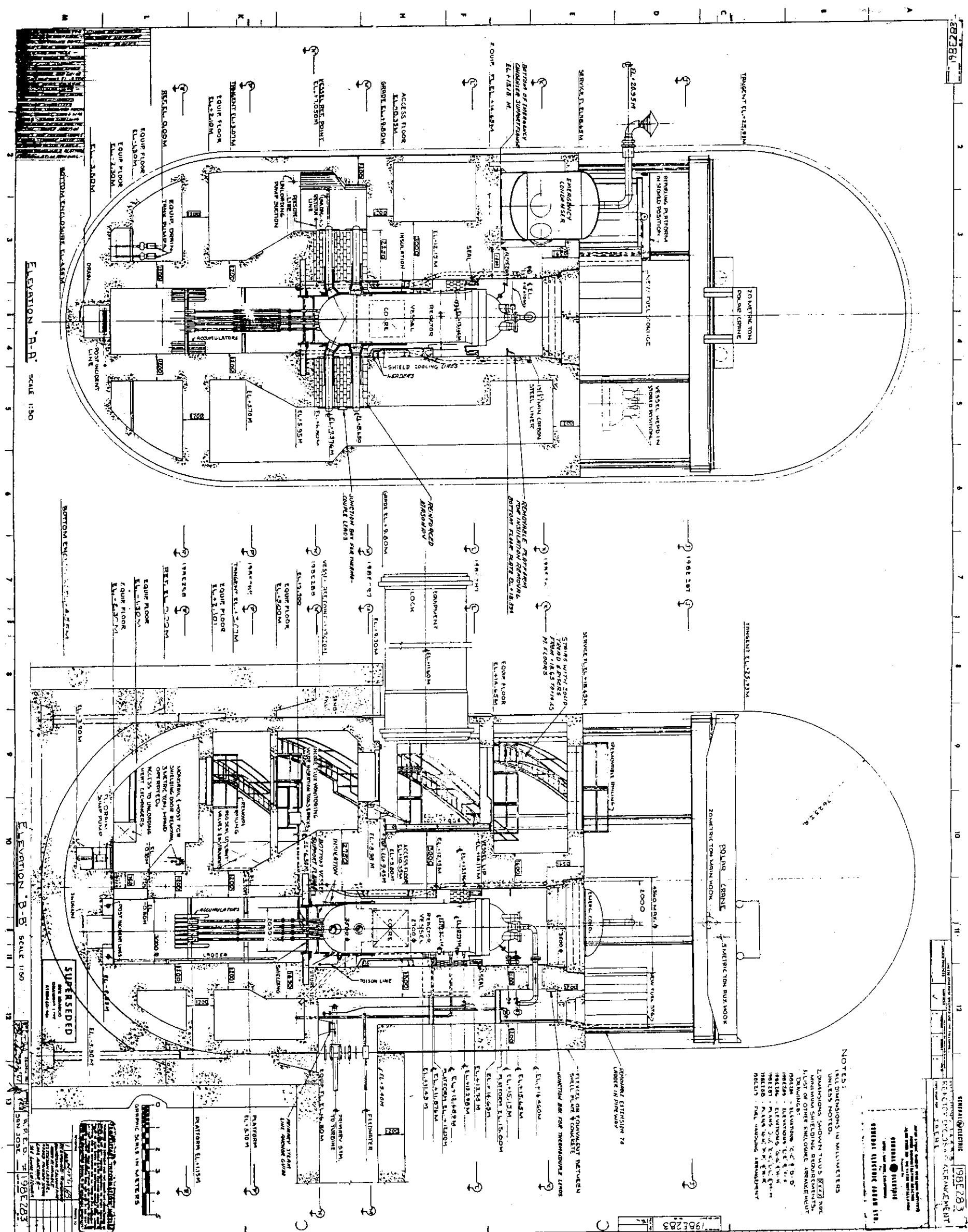


図2.1(1) 原子炉格納器建家断面図及び各階平面図

JAERI-M 90-205

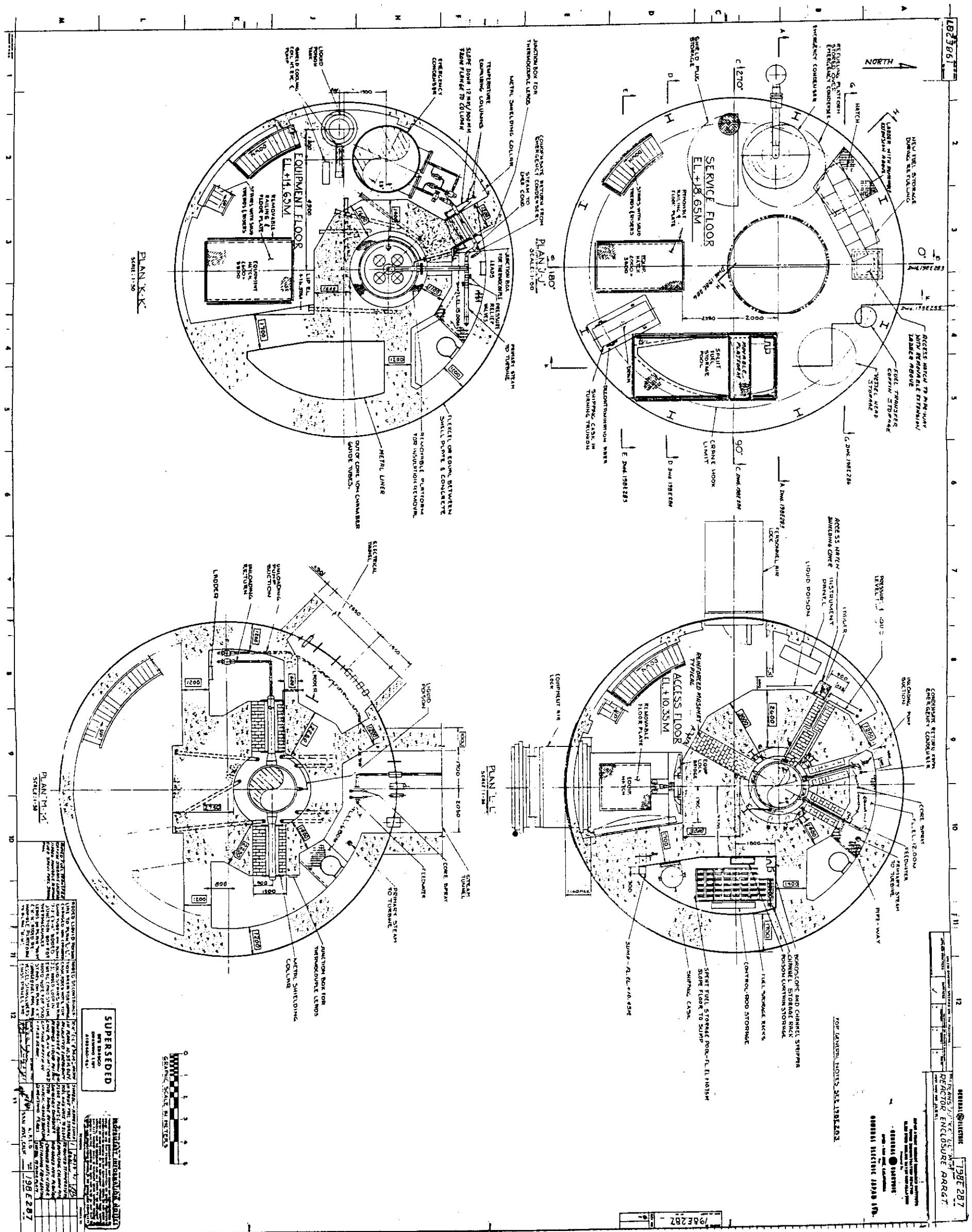


図2.1(2) 原子炉格納器建家断面図及び各階平面図

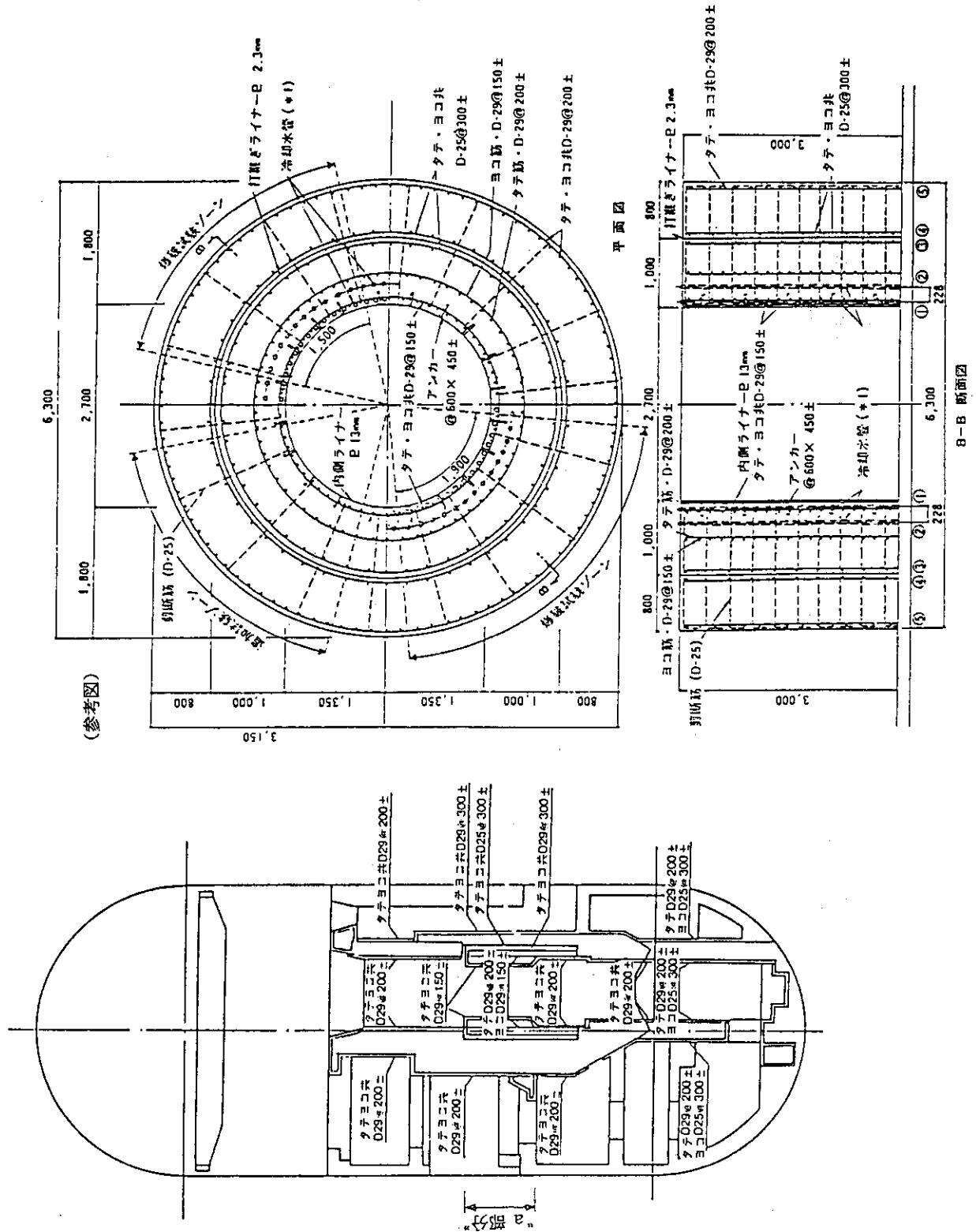


図 2.2 生体遮蔽体配筋図

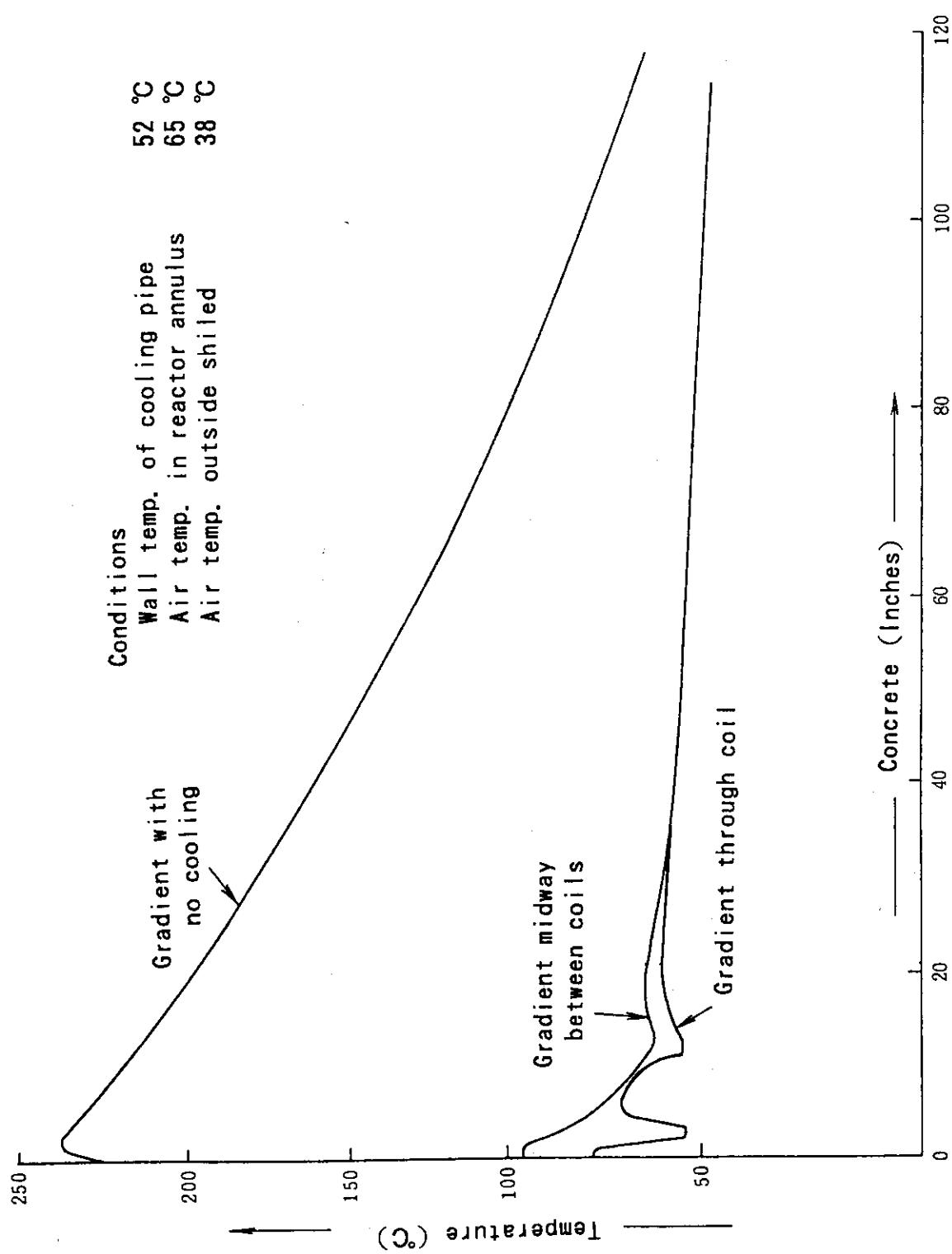


図2.3 生体遮蔽コントラクト内温度分布

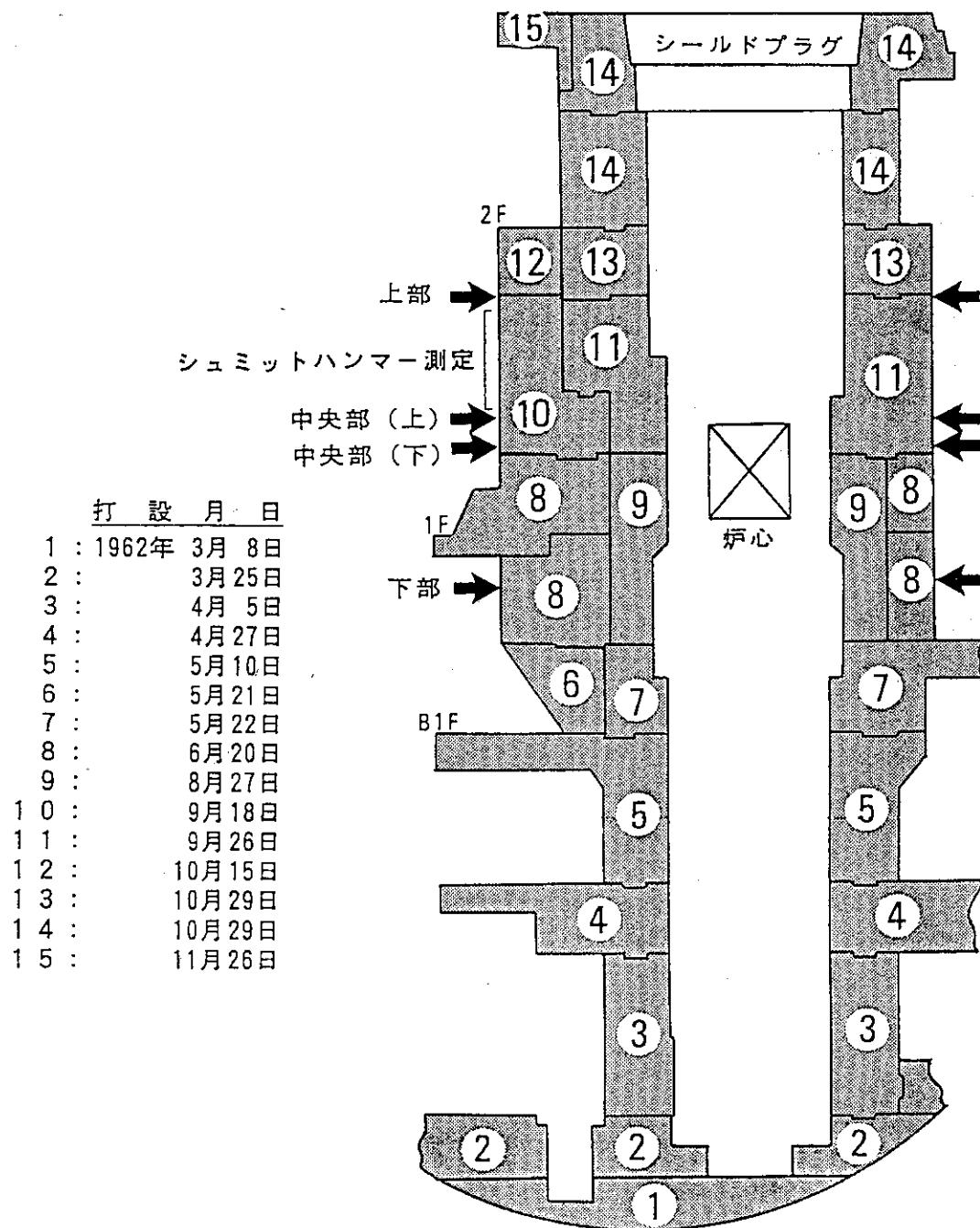


図 2.4 J P D R 生体遮蔽コンクリートの打設区分、打設時期および  
コアーボーリング位置

### 3. 解析及び試験方法

#### 3. 1 放射線照射量及び温度分布計算

生体遮蔽コンクリート内の放射線照射量及び温度分布については実測データが無い（2. 2に述べたように温度分布については実測データがわずかにある）ため、J P D Rの運転中に受けた放射線照射量と温度上昇は計算によって評価した。

生体遮蔽コンクリート内の放射線照射量及び温度分布の計算には中性子実効断面積、ガンマ線輸送断面積、二次ガンマ線生成断面積、中性子・ガンマ線発熱定数（カーマ・質量エネルギー吸収係数）等の群定数が必要となる。本計算ではこれらのデータをR A D H E A T - V 3 コードシステム<sup>3) 4)</sup>で作成後、中性子・ガンマ線一次元輸送計算コードA N I S N - J R<sup>5)</sup>によりエネルギー群ごとの中性子及びガンマ線束を求めた。また、採取したコンクリートコア位置での中性子照射量は、二次元輸送計算コードD O T 3. 5<sup>6)</sup>を用いR-Zの円柱モデル計算し、得られた中性子束から運転時間との積として得られる。生体遮蔽コンクリート内の発熱量は、A N I S N - J Rで得られた中性子束及びガンマ線束と先の発熱定数との積として求められる。R A D H E A T - V 3 コードによる群定数作成フローを図3. 1に、二次元中性子輸送計算モデルを図3. 2に示す。

また、生体遮蔽コンクリートの温度分布解析では、放射線照射に伴う発熱量と表面での対流及び輻射を考慮し、二次元任意形状の有限要素法によるH E A T R A N コードを用いてコンクリート内の温度分布を求めた。

#### 3. 2 コンクリートコアの採取

J P D Rの生体遮蔽コンクリートの炉心近傍部は、壁厚が1. 5~3. 0 mの普通コンクリートで作られ、原子炉圧力容器を取り囲む円筒状の構造である。コンクリートコアの採取位置は生体遮蔽コンクリートの打設状況、放射線の照射量、運転時の温度環境等を考慮して決定された。すなわち、コンクリートコアの採取に際しては、放射線照射量及び打設深さ等の条件を同一にするために、炉心との位置関係のみが平面对称となるよう選定した。具体的には、生体遮蔽コンクリートの南側（原子炉格納容器の180°方向、コンクリート厚さ：3 m）及び北側（原子炉格納容器の0°方向、コンクリート厚さ：1. 5 m）から、それぞれ6本のコンクリートコアを採取した。コンクリートコアの採取高さ及び採取角度を表3. 1及び図3. 3に示す。

コンクリートコアの採取は、内径80 mm<sup>Φ</sup>のビット及び一般的なコアドリルマシンを使用して、防塵と冷却を兼ねた冷却水を使う湿式法によって行われた。

コア採取に際しては、数多くの供試体が得られるようにコアの折損防止に注意を払ったが鉄筋、遮蔽冷却管、中継ぎライナーなどの埋め込み部材付近での折損は避けられなかった。その他の位置での折損は少なく、強度試験用に供することができた。採取したコンクリートコアの状態を図3. 4に示す。

採取したコンクリートコアの放射線線量率は、炉心側、炉心中心高さ付近で鉄筋が存在する部分が最も高く、表面で最大  $20 \text{ mR/h}$  ( $5 \mu\text{C/kg/h}$ )、表面汚染は  $1.6 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/cm}^2$  ( $0.06 \text{ Bq/cm}^2$ ) 以下であった。

### 3. 3 コンクリート供試体の製作

供試体の寸法は、圧縮強度用が長さ  $h = 2d$  ( $h$  = 供試体長さ、 $d$  = 供試体直径)、割裂引張り強度用が  $h = 1d$  を基準とした。コンクリートコアからの供試体の取り方は、圧縮強度試験用の供試体を優先して作ることとし、寸法的に圧縮強度用がとれない部分を使って割裂引張り強度用の供試体を作製した。

採取したコンクリートコアには、切断前に炉心側ライナー位置から  $10 \text{ cm}$  每の寸法を入れ、切り代の集積による供試体位置の誤差を少なくなるようにした。また、コンクリートコアの切断には、厚さ  $2.3 \text{ mm}$  のダイアモンドブレードを使い湿式で切断した。この結果、供試体の位置の寸法誤差は最大  $2 \text{ mm}$  程度である。

圧縮強度試験用の供試体には切断後、JIS A 1132 に準じて両端面に硫黄キャッピングを施し、キャッピング後の供試体長さ  $16 \text{ cm}$  を目標に仕上げた。

### 3. 4 材料強度測定方法

#### 3. 4. 1 圧縮強度試験

第1種管理区域内に設置されている容量  $100 \text{ t}$  のアムスラー型圧縮試験機を使い、JIS A1108 に準拠して圧縮強度試験を行った。供試体への載荷は、初めに約  $4 \text{ t}$  の初期荷重をかけて供試体端面（キャッピング面）と加圧板とをなじませた後、荷重を  $0$  に戻し、X-T記録計で荷重を記録しながら載荷した。載荷速度は、毎秒  $2 \sim 3 \text{ kgf/cm}^2$  の一定速度で最大荷重までの試験を行った。最大荷重に達すると同時に除荷し、供試体を破碎させない状態で最大荷重を求めた。

なお同時に、変位を測定するコンプレッソメータ及びひずみゲージ出力を X-Y レコーダに記録させ、荷重～変位曲線、荷重～ひずみ曲線を得た。圧縮強度試験の状況を図3.5に示す。

圧縮強度は JIS A1108 に定められた式（3. 1）により求めた。供試体の寸法は、精度  $1/20 \text{ mm}$  のノギスで測定した。なお、供試体の直径と長さの比から決まる補正係数  $C$  は、JIS A1132 に定められている値を基準にし、供試体の  $h/d$  の比が中間の場合の補正係数は補間法によって求めた値を使用した。なお、いくつかの供試体の端面の一部に切断の際に生じた小さな欠損が認められたが、キャッピングの硫黄で充填されていることから、圧縮強度計算の際の補正の対象にはしていない。

$$\sigma_c = C \frac{P_{\max}}{\pi (d/2)^2} \quad (3. 1)$$

ここに、 $\sigma_c$  : 圧縮強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$P_{\max}$  : 最大荷重 (kgf)

$C$  : 供試体の長さと直径の比で決まる補正係数 (JIS A1132)

$d$  : 次式から求まる供試体の平均直径 (cm)

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

ここに、  $d$  : 供試体の平均直径 (cm)

$d_1$ 、  $d_2$  : 実測した 2 方向の直径 (cm)

ヤング係数測定のため、圧縮強度試験時に供試体表面に取り付けた 2 個のコンプレッソメータを用いて変位を測定し、荷重-変位曲線を求めた。得られた荷重-変位曲線から J I S 原案<sup>7)</sup>に準じ、式 (3. 2) によりヤング係数を算出した。

$$E = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - 50 \times 10^{-6}} \quad (3. 2)$$

ここに、  $E$  : ヤング係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$S_1$  : 最大荷重の 1/3 に相当する応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$S_2$  : ひずみが  $50 \times 10^{-6}$  の時の応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\varepsilon_1$  : 応力  $S_1$  によって生じるひずみ (2 個のコンプレッソメータから得られたひずみの平均値)

また、ポアソン比測定のため、圧縮強度用供試体円筒部表面の 120° 間隔の 3 カ所にゲージ長 20 mm の 2 軸ひずみゲージを貼り、圧縮試験時に縦ひずみ及び横ひずみを測定した。ポアソン比は J I S 原案<sup>7)</sup>に準じ、最大荷重の 1/3 の時の横ひずみ量と縦ひずみ量から式 (3. 3) によりポアソン比を算出した。なお、ひずみ量は、各 3 枚のゲージの単純平均値を使用した。

$$\nu = \frac{\varepsilon_{h1} + \varepsilon_{h2} + \varepsilon_{h3}}{\varepsilon_{v1} + \varepsilon_{v2} + \varepsilon_{v3}} \quad (3. 3)$$

ここに、  $\nu$  : ポアソン比

$\varepsilon_h$  : 最大荷重の 1/3 の時の横ひずみ

$\varepsilon_v$  : 最大荷重の 1/3 の時の縦ひずみ

### 3. 4. 2 割裂引張り強度試験

引張り強度試験は、J I S A 1113 のコンクリートの引張り強度試験方法に準じて行った。引張り強度は式 (3. 4) によって算出することとし、これに必要な供試体の寸法は、圧縮試験の場合と同様にノギスによる測定値を用いた。供試体はコアボーリングにより採取したコアから製作したため、円筒部の面が必ずしも平滑でなく、加圧板と供試体

との接触線にすき間が生じるものもあった。このため、加圧板と供試体の間に厚さ2.0 mmの合板を入れ、接触面のすき間を小さくする試験方法を採用した。載荷速度は毎分4～5 kgf/cm<sup>2</sup>で、試験後の破面観察に供するため最大荷重に達すると同時に除荷する方法を採用した。

引張り強度試験終了後、試験後の供試体長さの測定、骨材とモルタルの割れ方の観察及び写真撮影を行った。

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi d h} \quad (3.4)$$

ここに、 $\sigma_t$ ：引張り強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 P : 最大荷重 (kgf)  
 d : 供試体の直径 (cm)  
 h : 供試体の長さ (cm)

### 3.5 シュミットハンマー法による非破壊試験

J P D R 生体遮蔽コンクリートからコアボーリングにより得られた供試体に対する圧縮強度試験のデータには放射線照射、温度上昇、打設高さによる影響が含まれている。しかし、炉心より最も遠い外表面側では、放射線の照射及びそれに伴う温度上昇の影響は無視でき、打設高さによる影響を評価できる可能性がある。そこで、J P D R 生体遮蔽コンクリートの南側（原子炉格納容器の180°方向）の外表面部についてシュミットハンマー法による圧縮強度の測定を実施した。測定対象箇所は、コアボーリングの上下の内側に位置し、ほぼ直線上に並んだ高さ方向で1.4 mの範囲とした。生体遮蔽コンクリートの表面にはエポキシ塗装等が施されているため、それをブラシ、サンダー等により除去し、コンクリートの地肌を露出させた後、反発硬度の測定を行った。

反発硬度の測定は、日本建築学会の「コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル」<sup>8)</sup>に準拠して行われた。使用したシュミットハンマーはスイスプロセク社製の「N型」のものを用い、水平方向の反発硬度を実測した。測定間隔は30 mmピッチで打撃することを原則とし、1測定箇所の打撃回数は20回としたため、1測定箇所の広さは約90×120 mmとなった。

得られた反発硬度の測定値が平均値の±20%を超えたときは、異常値として不採用にし、1測定箇所の測定値総数が20個となるよう再測定により補充した。得られた反発硬度から圧縮強度への換算は、日本建築学会の圧縮強度推定式(3.5)を用いた。

$$F = (-184 + 13R_0) \times a \quad (3.5)$$

ここに、F : コンクリート推定圧縮強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

$R_0$  : コンクリート表面の平均反発硬度

a : 材令による補正係数

(材令3,000日以上の場合 a = 0.63)

表 3.1 コンクリートコアの採取位置

コア番号	採取位置(エレベーション) E, L (m)	採取角度 (度)
G	13.35	187°
K	"	0
1 H	11.0	180
2 H	"	187
1 L	"	0
2 L	"	7
1 I	10.45	173
2 I	"	187
1 M	"	0
2 M	"	7
J	7.9	180
N	"	0

E, L : エレベーション(海拔高さ)

採取角度 : 0° = 北、180° = 南

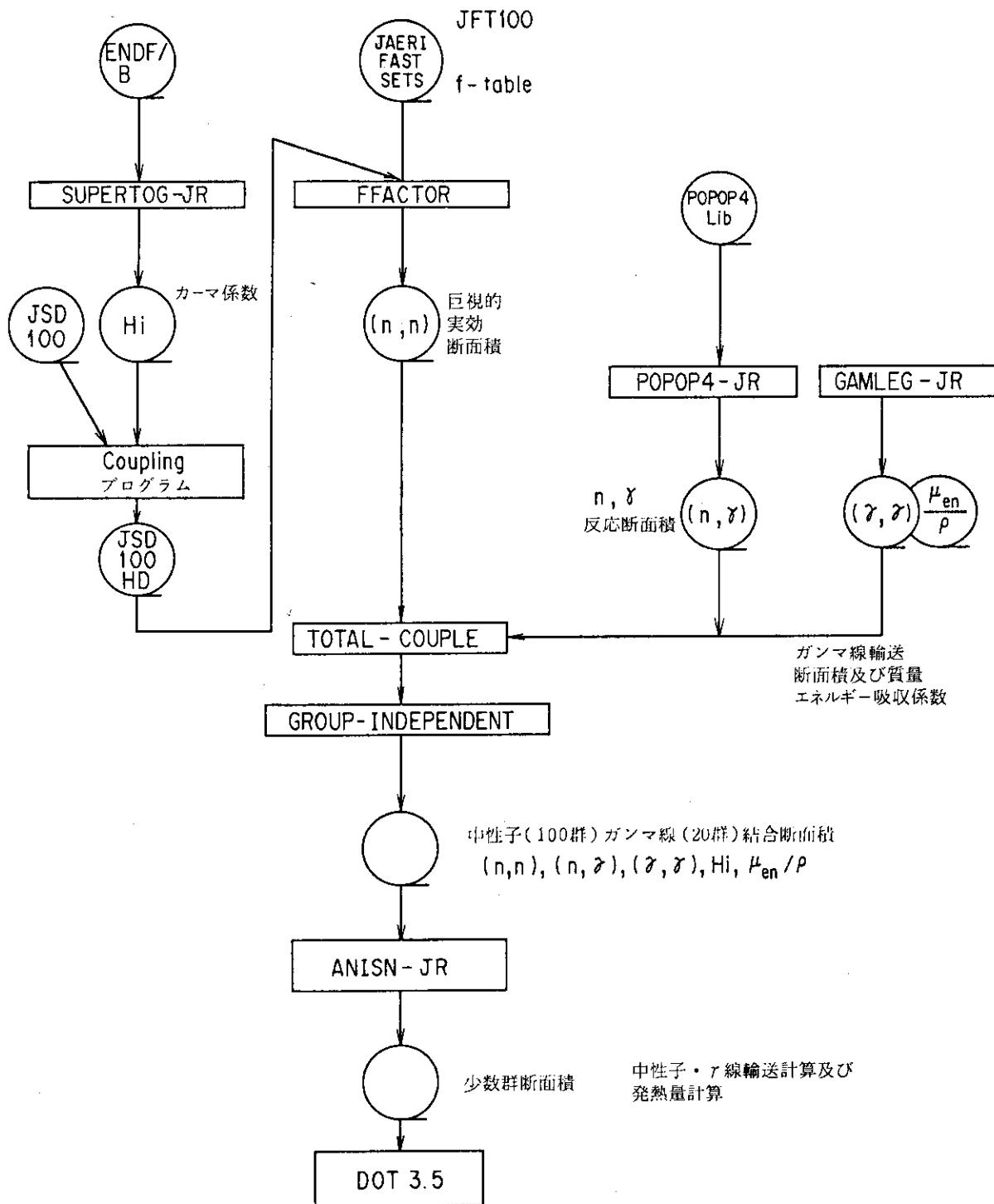


図 3.1 群定数作成フロー (RADHEAT - V3)

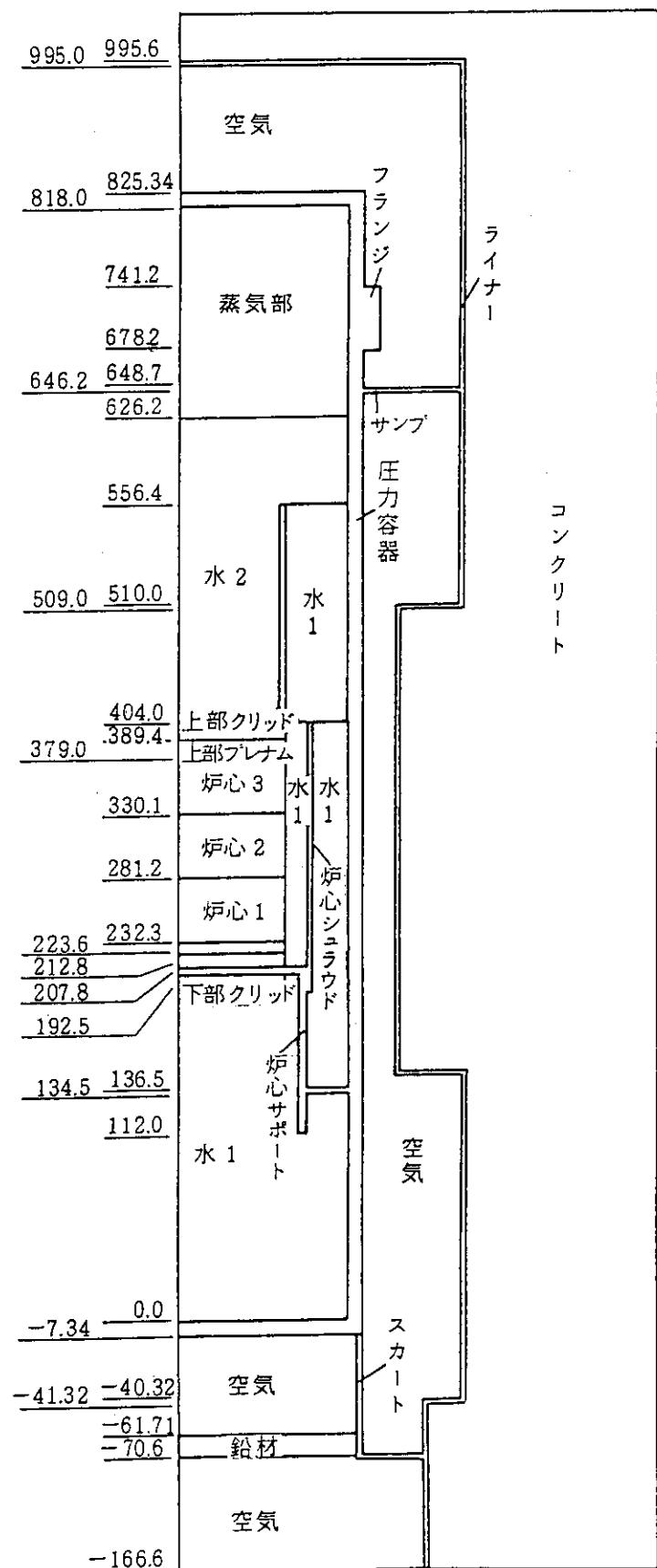


図 3.2 中性子・ガンマ線輸送計算モデル図

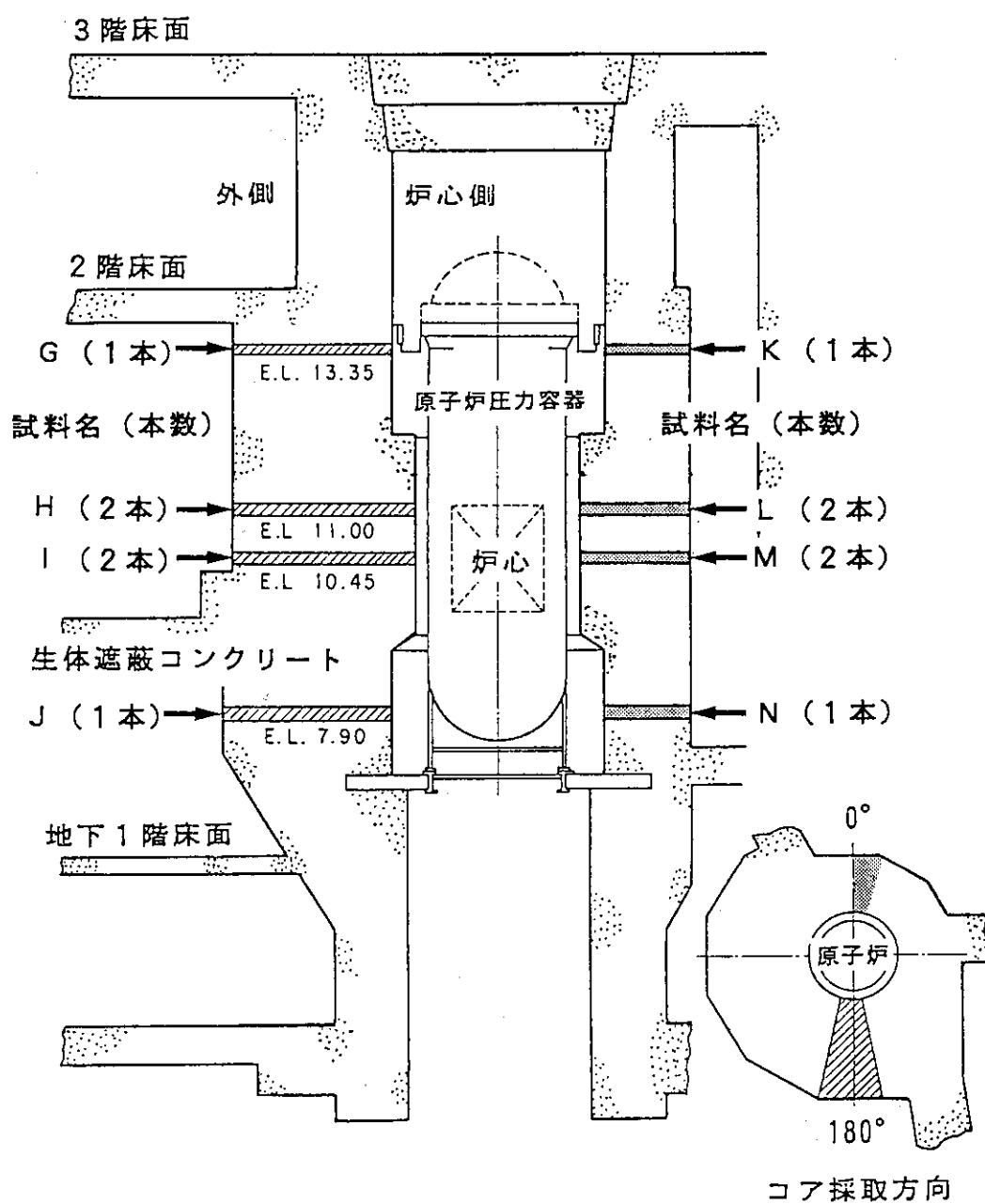


図 3.3 J P D R 生体遮蔽コンクリートコアの採取位置

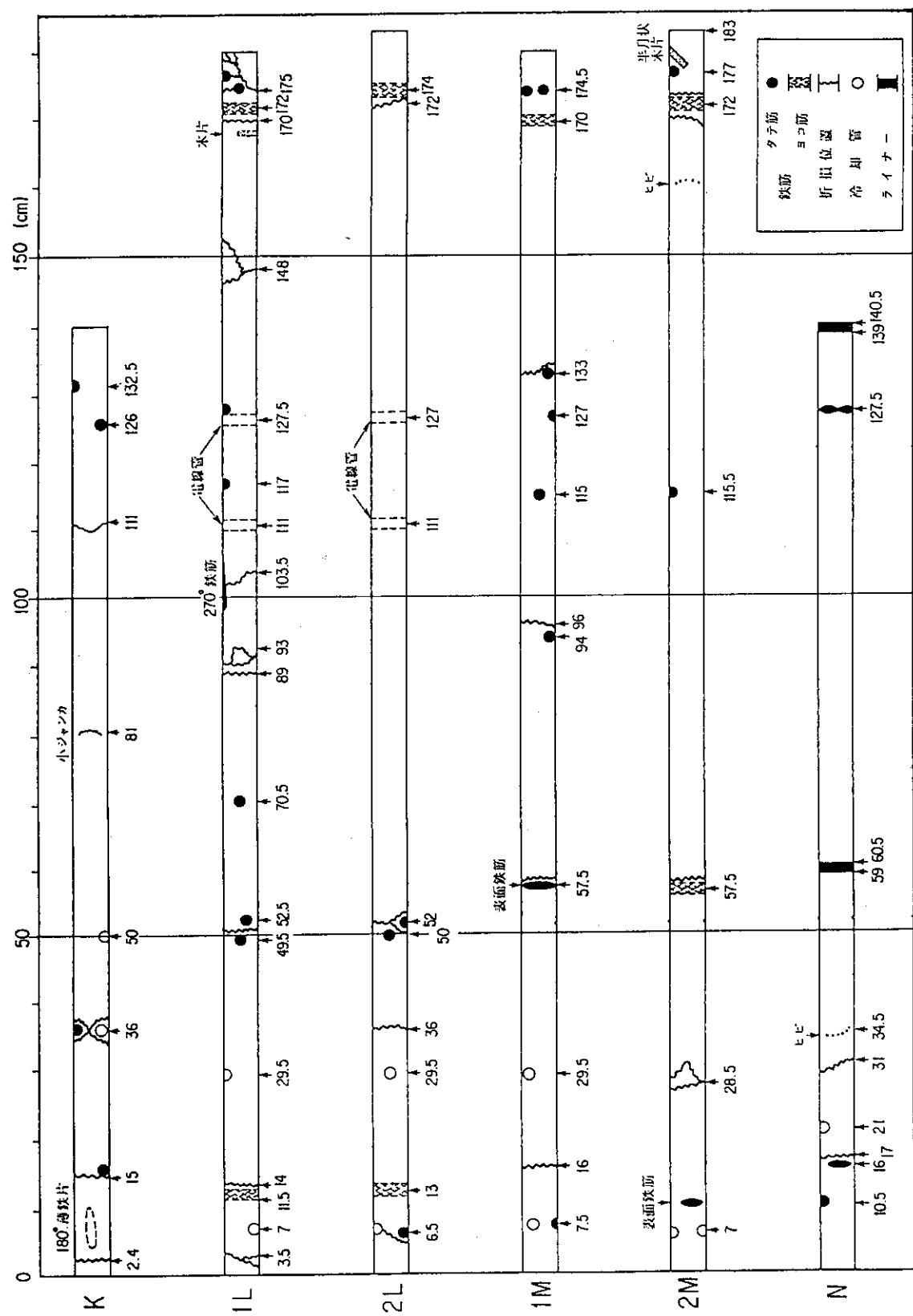


図3.4 採取コア状態図

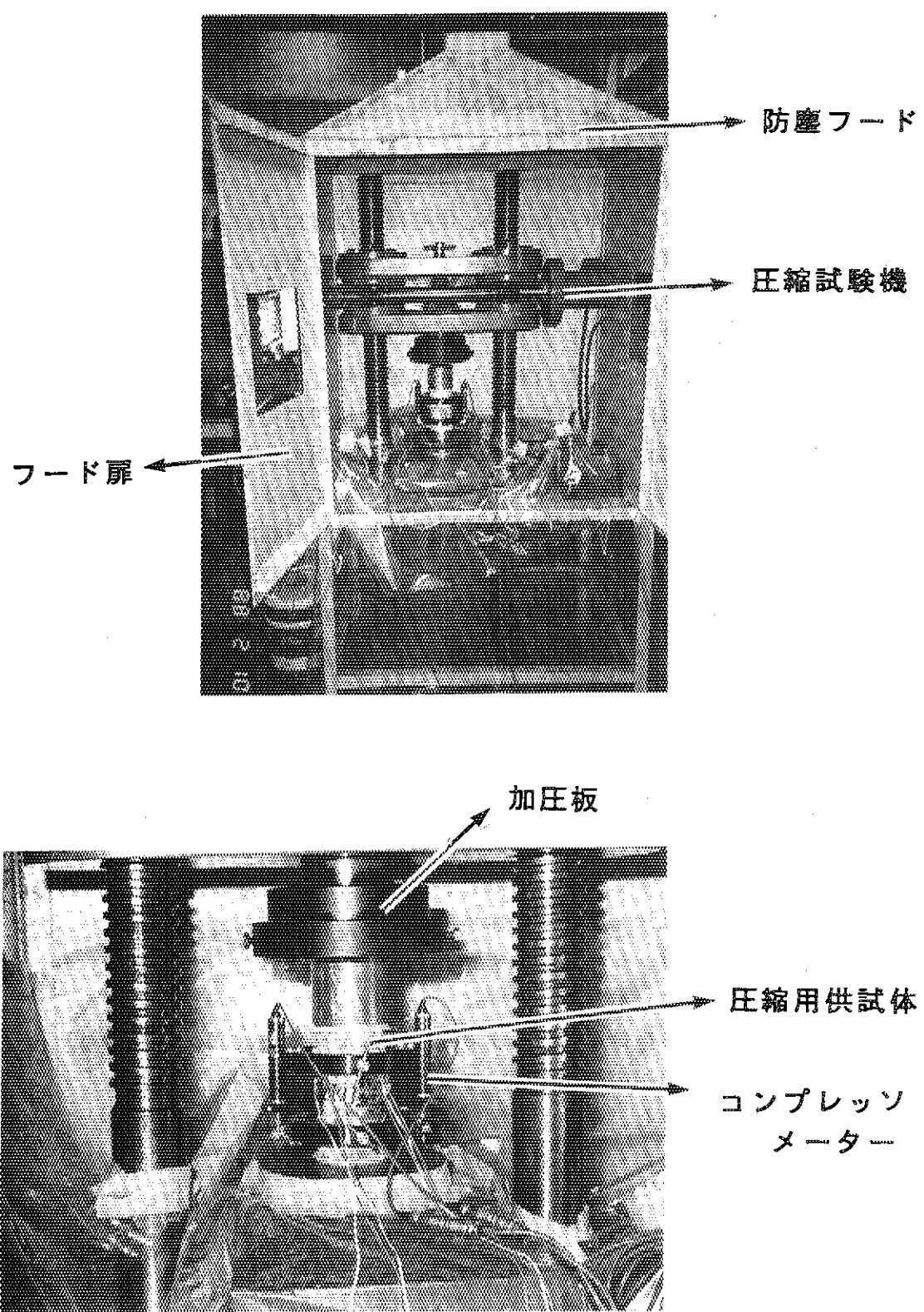


図3.5 圧縮強度試験の状況

## 4. 結果及び考察

### 4. 1 放射線照射量及び発熱量

#### 4. 1. 1 中性子及びガンマ線照射量

ANISN-JRによって得られた炉心中心高さ位置における炉心及び生体遮蔽コンクリート内の全中性子束分布を図4. 1に示す。強度試験に供した供試体の中性子照射量の評価には、DOT 3. 5コードによる二次元R-Z円柱モデル計算で得られた中性子束分布を利用した。まず、コンクリートの各コアの採取高さごとにDOT 3. 5コード計算による高速中性子束( $E > 0.11\text{MeV}$ )及び熱中性子束( $E < 1.85\text{eV}$ )分布図を作成した。計算によって得られた各コア採取高さごとの中性子束分布を図4. 2(1)から(4)に示す。これらの図から圧縮及び引張り強度試験用の供試体位置の中性子束を読み取り、定格出力換算のJPD-Rの運転時間との積として表4. 1に示す照射量を得た。

熱中性子に関しては、計算によって得られた中性子束分布が炉心中心から上下に離れるに従って測定値との誤差が大きくなるため、 $^{152}\text{Eu}$ の放射能測定値を用いて計算値を補正した。 $^{152}\text{Eu}$ の測定値を用いた理由は、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{154}\text{Eu}$ 等の放射性核種に比較して、熱中性子の吸収断面積が大きく、その生成が熱中性子束に依存しているからである。熱中性子の計算値は、 $^{152}\text{Eu}$ の測定値に比較して全般的に過大評価の傾向を示し、修正係数は1. 0以下に分布した。

放射線照射量の計算結果から、JPD-R生体遮蔽コンクリートの最大照射量は炉心側、炉心中心高さ位置において、高速中性子照射量が $1.1 \times 10^{18}\text{n/cm}^2$ 、熱中性子照射量が $4.7 \times 10^{17}\text{n/cm}^2$ であると推定される。

ANISN-JRコードにより得られた、炉心及び生体遮蔽コンクリート内のガンマ線束分布及びガンマ線エネルギー束分布を図4. 3及び図4. 4に示す。その結果、生体遮蔽コンクリートのガンマ線最大照射量として、コンクリート内表面、炉心中心高さ位置で $4.8 \times 10^8\text{Gy}$ を得た。

JPD-Rの運転に伴う生体遮蔽コンクリートの最大照射量は、炉心中心高さ、コンクリート内表面において高速中性子で $1.1 \times 10^{18}\text{n/cm}^2$ 、ガンマ線で $4.8 \times 10^8\text{Gy}$ と求められた。しかし、構造的な制限から最大照射量の部位から供試体は採取することが不可能であることから、今回の強度試験に供された供試体の照射量は、高速中性子で $1.9 \times 10^{17} \sim 4.1 \times 10^{16}\text{n/cm}^2$ の範囲のものに限定された。

既往の文献<sup>9)</sup>によれば、中性子照射に関しては $10^{19}\text{n/cm}^2$ 以上で、ガンマ線照射に関しては約 $10^9\text{Gy}$ 以上の累積線量で圧縮強度の低下が見られると報告されている。この文献の照射量と今回試験した供試体の照射量には2桁以上の差があることから、結果を直接比較することはできない。

一方、電気出力100万kW級のPWR型発電炉の定格出力運転時の生体遮蔽コンクリート内表面の高速中性子束は、 $\sim 2 \times 10^8\text{n/cm}^2\text{s}$ との報告がある<sup>10)</sup>。この発電炉

を稼働率80%で40年運転した場合の生体遮蔽コンクリートが受けるであろう高速中性子の最大照射量は、 $\sim 2 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$ と推定される。このことから、今回対象にしたJ P D Rの生体遮蔽コンクリートは、大型商用炉の寿命の後半に受けるであろう照射量に相当したものであると考えられる。

#### 4. 1. 2 発熱量及び温度分布

A N I S N - J Rによる一次元輸送計算により得られた中性子束及びガンマ線束と発熱定数の積として求められた生体遮蔽コンクリート内の発熱量を図4. 5に示す。これらの計算結果から生体遮蔽コンクリート内での発熱量は、内表面位置で中性子により $3.0 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^3$ 、ガンマ線に関しては一次ガンマ線及び二次ガンマ線を合わせて $5.7 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^3$ と求められた。このことから、生体遮蔽コンクリート内での最大発熱量は、中性子及びガンマ線の合計で $6.0 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^3$ となり、図4. 5に示すとおりコンクリート内の発熱は、ガンマ線に大きく依存する。

また、A N I S N - J Rコードによるガンマ線及び中性子についての各々単独の計算結果により、コンクリート内表面から外表面に向かって一次ガンマ線より二次ガンマ線の寄与が大きくなることが確認された。

以上の結果から、コンクリート内表面からの距離を $t$  (cm)とした時、運転中の放射線照射に伴うコンクリート内での発熱量は式(4. 1)で近似される。

$$Q(t) = 5.9 \times 10^{-3} \exp(-0.078t) \quad (\text{W/cm}^3) \quad (4. 1)$$

J P D Rの生体遮蔽コンクリートの置かれた温度環境として、打設時の水和反応に伴う発熱及び運転時の放射線の照射に伴う発熱の二つが考えられる。

コンクリート打設時の水和発熱に起因するコンクリート内の温度分布計算により、次のような結果を得た。

- 1) コンクリート打設後の経過日数ごとの等温線分布(図4. 6(1)及び(2))
- 2) コンクリート内の主要接点の温度履歴(図4. 7)
- 3) 各時刻における生体遮蔽コンクリート厚さ方向の温度分布(図4. 8(1)及び(2))

これらの解析結果より、打設時の温度環境は以下の条件であったと推定される。

- ①打設時の最大温度は、コンクリート中心部で打設後約4日経過時に約58°Cになる。
- ②コンクリート内外表面の温度上昇量は、内側ライナー部では1日経過時に約6°C、室内側表面では1.5日経過時に約9°C程度にとどまっている。
- ③コンクリートの内外表面と最大温度を示した中心部とで約32°Cの温度差が生じた。
- ④生体遮蔽コンクリート全体としては、打設後3日経過時に最大温度に達し、その後1ヶ月程度かけて徐々に冷却される。冷却に時間を要することは、コンクリートの容積が大きく、熱容量が大きいことによるものと推定される。

一方、J P D Rを定格出力(熱出力45MW)で運転した場合の生体遮蔽コンクリー

ト内の温度分布解析により、次のような結果を得た。

- 1) 運転時の最高温度は、炉心側内表面で46°Cとなる(図4.9)。
- 2) 生体遮蔽コンクリート内部では、遮蔽冷却管の周囲で大きく低下するが、再び温  
し、その外側では室内側に向かって緩やかに低下する(図4.10(1)  
及び(2))
- 3) 遮蔽冷却管による冷却効果が大きく、冷却管周囲で25°Cを示した(図4.10  
(1)図A)。

以上のコンクリート打設時及び運転時の温度解析結果から、生体遮蔽コンクリートが晒された最高温度は、打設時の水和発熱に起因して打設後4日目に最大で57°C程度になったものと推定される。ただし、この値は厚さ3mのコンクリートを一度に打設したと仮定した時のものであり、実際の打設が中継ぎライナーの内側と外側とで2回に分けられていること等を考慮すると、水和発熱によるコンクリート温度は57°Cを大きく下回っているものと推定される。

一方、JPDR生体遮蔽コンクリートの運転中の温度環境は、定格出力運転中でも最高46°C程度、温度差は最大で約20°C程度と推定され、コンクリートにとって過酷な温度環境条件にあったとは考えられない。特に、生体遮蔽コンクリート内に埋め込まれている遮蔽冷却用配管がコンクリート全体の温度を下げるために大きく寄与していることがうかがえる。また、この解析結果は、JPDR建設時に生体遮蔽コンクリート内の厚さ方向の7箇所に埋め込まれた熱電対式温度計による原子炉出力40MWt時の測定結果との比較からも妥当なものと言える。

#### 4. 2 圧縮強度、ヤング係数及びポアソン比

JIS A1108でのコンクリートの試験法では、供試体3個の平均値を圧縮強度としている。一方、JPDRの生体遮蔽コンクリートを対象にした試験では、供試体数の制限から同一条件の供試体は1個と限定されているため、1供試体から1データとした。

JPDRの生体遮蔽コンクリートから採取された合計50個の試料の圧縮試験から、表4.2に示すように300~630kgf/cm<sup>2</sup>と幅広く分布する圧縮強度が得られた。これらの圧縮強度は、4種類の打設深さの供試体の全データである。

##### (1) 打設深さによる補正

打設深さが圧縮強度に及ぼす影響は少なくない<sup>11)</sup>ことから、打設深さの異なる各供試体間の補正を必要とする。図4.11は打設順序・日時等、同一の打設条件と考えられるGとK、HとL、IとMの3水準の打設深さで、かつ、高速中性子照射量( $E>0.11\text{MeV}$ )が $10^{13}\text{n/cm}^2$ 以下の試料の圧縮強度を用いて、打設深さが圧縮強度に及ぼす影響を表したものである。打設深さが強度に及ぼす影響として直線近似できるとの報告があることから、得られたデータの最小自乗法による直線近似の結果として、式(4.2)が得られる。

$$\sigma_c = 34.5 \cdot H + 358.0 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4.2)$$

ここに、 $\sigma_c$  : 圧縮強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

H : 打設深さ (m)

すなわち、供試体の高さ方向の採取位置の違いにより、圧縮強度に  $34.5 \text{ kgf/cm}^2/\text{m}$  の差が生ずることを示している。この値を打設深さの影響として、打設深さの違いを補正した。表4. 2の右欄は、この補正值を用いて、各打設深さの実測データを打設深さを  $0 \text{ cm}$  相当に補正した結果である。打設深さによる影響を補正し、打設深さを  $0 \text{ cm}$  とした時の圧縮強度は、 $220 \sim 530 \text{ kgf/cm}^2$  に分布した。

### (2) 圧縮強度に及ぼす高速中性子照射の効果

同一の打設深さ位置のデータを用いて高速中性子照射の影響を検討した。図4. 12はコア採取高さ  $E.L = 11.0 \text{ m}$ 、すなわち炉心中心高さから採取されたコア  $1H$ 、 $2H$  及び  $1L$ 、 $2L$  のデータである。このデータの最小自乗法による直線近似の結果として、式(4. 3)が得られる。

$$\sigma_c = 11.5 \cdot \log(\Phi) + 271.6 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4. 3)$$

ここに、 $\sigma_c$  : 圧縮強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$\Phi$  : 高速中性子照射量 ( $\text{n/cm}^2$ )

また、図4. 13は  $E.L = 10.45 \text{ m}$  から採取された  $1I$ 、 $2I$  及び  $1M$ 、 $2M$  のデータである。ここに、最小自乗法による直線近似の結果として、式(4. 4)が得られる。

$$\sigma_c = 12.0 \cdot \log(\Phi) + 286.0 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4. 4)$$

ここに、 $\sigma_c$  : 圧縮強度

$\Phi$  : 高速中性子照射量 ( $\text{n/cm}^2$ )

式(4. 3)及び(4. 4)のいずれも、高速中性子照射量の増加にともない、圧縮強度も増加する傾向を示し、高速中性子照射量が 10 倍増えることにより、圧縮強度は約  $12 \text{ kgf/cm}^2$  増加することを示している。

図4. 14は打設深さの差異を考慮せず、 $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$  ( $E > 0.11 \text{ Mev}$ )以上の全データについて、圧縮強度と高速中性子照射量の関係を示したものである。中性子照射量の 10 倍の増加にともない、約  $17 \text{ kgf/cm}^2$  の圧縮強度の増加をもたらしている。図4. 15は打設深さの差異を補正し、打設深さ  $0 \text{ cm}$ 相当の圧縮強度と高速中性子照射量との関係である。ここでも、高速中性子照射量が 10 倍増えることにより、圧縮強度は約  $10 \text{ kgf/cm}^2$  増加することを示した。

### (3) ヤング係数及びポアソン比

ヤング係数及びポアソン比の測定結果を表4. 3に、ヤング係数と打設深さの関係を図4. 16に示す。打設深さの違いがヤング係数に及ぼす影響は明確に確認される。この打設深さの影響を補正し、打設深さ  $0 \text{ cm}$ 相当に換算した場合のヤング係数と圧縮強度

及びヤング係数と高速中性子照射量の関係を図4. 17及び図4. 18に示す。高速中性子照射がヤング係数に及ぼす影響については僅かに認められるが、圧縮強度がヤング係数に及ぼす影響と同様に明確ではない。

コンクリートのヤング係数を圧縮強度との関数として表示する方法については多くの提案がある。ここでは、 $1, 5 \sim 2, 5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  の分布として得られたヤング係数と日本建築学会RC規準<sup>12)</sup>によって求められるヤング係数と比較してみる。同規準は、圧縮強度と密度をパラメーターにした表示式であり、ここでは密度を  $2, 3 \text{ g/cm}^3$  と仮定する。圧縮強度が 300、400、500 及び  $600 \text{ kgf/cm}^2$  の場合に求められるヤング係数は、各々 2.57、2.97、3.32、及び  $3.64 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  となる。今回の試験で得られたヤング係数は、同規準が示す明確な傾向は示さず、同規準よりも小さめに分布した。

ポアソン比と打設深さ、ポアソン比と圧縮強度及びポアソン比と高速中性子照射量の関係を図4. 19から図4. 21に示す。ポアソン比に関しては、打設深さ、圧縮強度及び高速中性子照射量のいずれの影響も認められなかった。

ポアソン比は作用応力レベル及びコンクリートの種類により若干異なるが、今回の測定で得られたポアソン比は  $0.16 \sim 0.20$  の範囲に数多く分布した。日本建築学会RC規準<sup>12)</sup>に定めるポアソン数  $m = 6$  (ポアソン比 = 0.17) と比較しても、大きな差異は認められない。

J P D R の生体遮蔽コンクリートから採取したコアを使って行われた強度試験により  $300 \sim 630 \text{ kgf/cm}^2$  の分布、及び平均で  $447 \text{ kgf/cm}^2$  の圧縮強度が得られた。打設深さが圧縮強度に及ぼす影響及び中性子照射量と圧縮強度の関係等の検討から、打設後 27 年経過した J P D R の生体遮蔽コンクリートに関して、次の点が確認される。

- ①得られた圧縮強度は、建設当時の調合設計資料 (水セメント比 = 4.8%) をもとに試算した調合強度  $363 \text{ kgf/cm}^2$  と比べても、平均で 20% 以上上回っている。
- ②放射線照射量と圧縮強度の関係を見ると、今回の試験で対象にした  $10^{17} \text{n/cm}^2$  までの高速中性子 ( $E > 0.11 \text{ MeV}$ ) 照射の範囲では、コンクリートの圧縮強度の低下は認められず、逆に強度が漸増する傾向を示した。この傾向は、打設深さの補正の有無に拘らず、変わらない。また、同一打設深さだけの供試体のデータだけの比較でも同様な傾向を示すことが明らかとなった。
- ③ガンマ線は最大で  $10^8 \text{ Gy}$  程度の照射量であり、照射に伴うガンマ発熱によるコンクリート内温度も遮蔽冷却管の効果で  $40 \sim 50^\circ\text{C}$  以上の温度に晒されていないと推定された。同一打設深さだけのデータによる検討により、炉心からの距離、照射量及び温度以外は同一の条件であると考えられることから、放射線照射、照射に伴う温度、及び含水量が圧縮強度に影響を及ぼしたものと推定される。
- ④高速中性子及びガンマ線照射がコンクリートのヤング係数及びポアソン比に及ぼす影響については認められなかった。
- ⑤コンクリート打設時の打設深さが圧縮強度に影響を及ぼし、打設深さが大きくなると圧縮強度も増加する傾向を示した。これらの結果は、先に示した既往の文献の傾

向とも一致している。

#### 4. 3 割裂引張り強度

16個の供試体を用いて実施した割裂引張り強度試験の結果を表4. 4に示す。図4. 22は、引張り強度と打設深さの関係を、図4. 23は引張り強度と高速中性子照射量の関係を示したものである。打設深さ(H)及び中性子照射(Φ)が割裂引張り強度に及ぼす影響としては、

$$\sigma_t = 0.009 \cdot H + 33.5 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$\sigma_t = 0.89 \cdot \log(\Phi) + 25.2 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

で表せるが、いずれも有意の差は認められなかった。

今回の試験で得られた引張り強度は30～45 kgf/cm<sup>2</sup>に分布し、平均で37 kgf/cm<sup>2</sup>を示した。引張り強度は圧縮強度の1/8～1/13<sup>13)</sup>に分布するとされている。今回の30～45 kgf/cm<sup>2</sup>の値は、平均圧縮強度の1/10～1/15に相当し、少し小さめの傾向を示している。圧縮強度が大きくなる、又は材令増加に伴う引張り強度の増加は圧縮強度の増加に比べて小さくなる傾向を示すと言われている<sup>14)</sup>ことから、材令27年のコンクリートの測定値として小さめの傾向を示した先の数値は妥当な範囲であると言える。また、圧縮強度に現れた打設深さ及び高速中性子照射の影響は、引張り強度では確認されなかった。これは、引張り強度の絶対値が小さく、かつ、コアボーリングにより採取した供試体のため、試験条件が必ずしも良好ではないことによるデータのばらつき等によるものと考えられる。

#### 4. 4 シュミットハンマーによる強度試験

J P D R 生体遮蔽コンクリートの打設深さの影響を確認するため、打設深さの異なる5ヶ所でシュミットハンマーによる反発係数を測定した。得られた測定結果を図4. 24に示す。また、得られた反発係数から日本建築学会の推定式により算出した圧縮強度を表4. 5に示す。

J P D R の施工記録によれば、測定点No. 1及びNo. 5は同一の打設区分に含まれており、同時に打設されたものと推定される。このことから、高さ方向の強度差は打設深さの効果と見ることができる。生体遮蔽コンクリート表面のコアボーリング試料による圧縮強度そのものはないが、表面近傍の採取試料の圧縮試験データとシュミットハンマーによる推定圧縮強度を図4. 25に示す。シュミットハンマーにより得られる打設深さ方向の影響は一次式で近似でき、その勾配から圧縮強度換算で約65 kgf/cm<sup>2</sup>/mと見ることができる。一方、コアボーリングにより採取された供試体から得られた圧縮強度は、約38 kgf/cm<sup>2</sup>/mである。

シュミットハンマー法の場合、コンクリートの強度以外の因子が反発硬度に影響を及ぼすことが知られている。今回の測定対象は実構造物のため、測定箇所表面の塗料を除去したのみで、長期材令の場合に推奨されている5～10 mm程度の研磨は実施していない。このため、材令による補正係数を用いて圧縮強度を推定したが、得られた圧縮強度

はコンクリートコアから得られた値に比べて大きく下廻り、長期材令の場合、炭酸化の影響で反発硬度は大きくなる<sup>15)</sup> という傾向と異なった。この原因は特定できないが、シュミットハンマー法自身がコンクリートの表面状態に大きく影響され易いこと、並びにコンクリートの中性化が10mm未満の場合には、長期材令であっても補正係数 $\alpha$ は1.0に近づくとの報告<sup>16)</sup> もあり、J P D R の中性化の状況から補正係数0.63は過少評価しすぎている等によるものと推定される。しかし、打設深さの違いは明確に把握されていることから、コンクリートの強度分布の傾向を簡易に把握する等、限定された条件では有効な手法と考えられる。

表 4.1 コンクリート試料に対する中性子照射量

試 料 番 号	中性子束 (n/cm <sup>2</sup> s)	修 正 係 数	照 射 量 (n / cm <sup>2</sup> )
	高 速 中 性 子 束	高 速	高 速
	熱 中 性 子 束	熱	熱
1 I - 3	4.5 + 9 ~ 1.0 + 9	1.00 ~ 1.00	1.86 + 17 ~ 4.13 + 16
	1.72 + 10 ~ 8.3 + 9	0.68 ~ 0.47	4.83 + 17 ~ 1.61 + 17
1 I - 7	5.0 + 8 ~ 1.05 + 8	1.00 ~ 1.00	2.07 + 16 ~ 4.34 + 15
	5.3 + 9 ~ 1.32 + 9	0.44 ~ 0.35	9.64 + 16 ~ 1.91 + 16
2 I - 4	4.9 + 8 ~ 1.55 + 8	1.00 ~ 1.00	2.02 + 16 ~ 6.41 + 15
	5.1 + 9 ~ 1.9 + 9	0.44 ~ 0.36	9.28 + 16 ~ 2.83 + 16
2 I - 9	2.95 + 7 ~ 6.2 + 6	1.00 ~ 1.00	1.22 + 15 ~ 2.56 + 14
	3.6 + 8 ~ 8.8 + 7	0.31 ~ 0.26	4.61 + 15 ~ 9.46 + 14
1 H - 8A	1.95 + 8 ~ 5.6 + 7	1.00 ~ 1.00	8.06 + 15 ~ 2.31 + 15
	2.2 + 9 ~ 7.5 + 8	0.44 ~ 0.35	4.00 + 16 ~ 1.09 + 16
1 H - 13	1.25 + 7 ~ 2.8 + 6	1.00 ~ 1.00	5.17 + 14 ~ 1.16 + 14
	1.7 + 8 ~ 3.8 + 7	0.31 ~ 0.26	2.18 + 15 ~ 4.08 + 14
2 H - 3	1.85 + 9 ~ 5.4 + 8	1.00 ~ 1.00	7.64 + 16 ~ 2.23 + 16
	7.7 + 9 ~ 4.4 + 9	0.71 ~ 0.5	2.26 + 17 ~ 9.09 + 16
2 H - 7B	3.1 + 8 ~ 8.0 + 7	1.00 ~ 1.00	1.28 + 16 ~ 3.31 + 15
	3.2 + 9 ~ 1.1 + 9	0.47 ~ 0.38	6.22 + 16 ~ 1.73 + 16
2 H - 13	1.25 + 7 ~ 2.8 + 6	1.00 ~ 1.00	5.17 + 14 ~ 1.16 + 14
	1.7 + 8 ~ 3.8 + 7	0.31 ~ 0.26	2.08 + 15 ~ 4.08 + 14
G - 2	1.0 + 8 ~ 1.7 + 7	1.00 ~ 1.00	4.13 + 15 ~ 7.02 + 14
	1.05 + 8 ~ 1.4 + 7	1.45 ~ 1.07	6.29 + 15 ~ 6.19 + 14
G - 6B	1.2 + 6 ~ 1.85 + 5	1.00 ~ 1.00	4.96 + 13 ~ 7.64 + 12
	3.3 + 7 ~ 7.5 + 6	0.33 ~ 0.17	4.50 + 14 ~ 5.27 + 13
J - 5B	2.4 + 6 ~ 4.3 + 5	1.00 ~ 1.00	9.92 + 13 ~ 1.78 + 13
	7.0 + 7 ~ 1.95 + 7	0.34 ~ 0.23	9.84 + 14 ~ 1.85 + 14
J - 13C	5.0 + 6 ~ 1.2 + 3	1.00 ~ 1.00	2.07 + 11 ~ 4.96 + 10
	2.8 + 5 ~ 7.0 + 4	0.07 ~ 0.04	8.10 + 11 ~ 1.16 + 11

表 4.2 圧縮強度試験結果

供試体名	実測圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	打設深さ補正後の 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
G 2	3 8 4	3 8 1
G 6 B	3 6 4	3 6 1
G 1 4 C	3 9 3	3 9 0
1 H 8 A	4 1 4	3 2 9
1 H 1 3	4 0 2	3 1 7
1 H 1 6 A	4 3 6	3 5 1
2 H 3	4 6 0	3 7 5
2 H 7 B	4 4 0	3 5 5
2 H 1 3	4 2 0	3 3 5
2 H 2 0 B	3 8 6	3 0 1
1 I 3	6 3 1	5 2 8
1 I 7	4 5 9	3 5 6
1 I 1 4	4 5 5	3 5 2
2 I 4	5 1 6	4 1 3
2 I 9	4 7 1	3 6 8
2 I 1 4	4 6 1	3 5 8
J 5 B	4 5 8	3 7 3
J 1 3 C	3 7 2	2 8 7
J 1 9	3 0 2	2 1 7
K 6	3 9 7	3 9 4
K 1 1	3 7 4	3 7 1
K 1 4	3 1 2	3 0 9
1 L 6	4 6 9	3 8 4
1 L 9	4 7 4	3 8 9
1 L 1 1	4 4 6	3 6 1
1 L 1 5	5 4 1	4 5 6
1 L 1 8	4 9 5	4 1 0
2 L 3	4 8 6	4 0 1
2 L 9	4 3 7	3 5 2
2 L 1 0	4 4 8	3 6 3
2 L 1 1	4 2 5	3 4 0
2 L 1 5	5 2 8	4 4 3
2 L 1 7	4 6 6	3 8 1
1 M 5	4 4 1	3 3 8
1 M 9	4 4 2	3 3 9
1 M 1 0	4 6 6	3 6 3
1 M 1 3	4 3 9	3 3 6
1 M 1 8	4 5 5	3 5 2
1 M 1 9	4 4 1	3 3 8
2 M 2	5 1 8	4 1 5
2 M 5	4 9 3	3 9 0
2 M 9	4 7 5	3 7 2
2 M 1 0	4 4 7	3 4 4
2 M 1 2	4 6 2	3 5 9
2 M 1 4	4 6 4	3 6 1
2 M 1 5	4 6 9	3 6 6
N 5	3 8 1	2 9 6
N 8	5 0 7	4 2 2
N 9	4 7 8	3 9 3
N 1 0	4 5 2	3 6 8

表 4.3 ヤング係数及びポアソン比測定結果

試料名	ヤング係数 ( $\times 10^5$ kgf/cm $^2$ )	ポアソン比
G 2	2. 9 4	
G 6 B	3. 2 2	
G 1 4 C	1. 8 6	
K 6	(*)	0. 1 6 4
K 1 1	1. 8 1	0. 2 1 5
K 1 4	2. 8 0	0. 1 5 0
1 H 8 A	2. 8 9	
1 H 1 3	2. 7 1	
1 H 1 6 A	3. 2 9	
2 H 3	3. 3 0	
2 H 7 B	2. 9 1	
2 H 1 3	3. 0 4	
2 H 2 0 B	3. 7 5	
I L 6	3. 2 3	0. 1 6 0
I L 9	2. 9 9	(*)
1 L 1 1	2. 5 4	0. 1 7 0
1 L 1 5	2. 6 6	0. 2 1 7
1 L 1 8	2. 4 6	0. 2 1 0
2 L 3	3. 0 5	0. 2 0 6
2 L 9	2. 4 5	0. 1 8 0
2 L 1 0	2. 6 8	0. 1 9 7
2 L 1 1	2. 8 5	0. 1 9 4
2 L 1 5	3. 0 6	0. 2 0 1
2 L 1 7	2. 9 0	0. 1 6 5
1 I 3	3. 5 6	
1 I 7	3. 8 0	
1 I 1 4	3. 0 5	
2 I 4	2. 9 4	
2 I 9	3. 3 9	
2 I 1 4	3. 3 1	
1 M 5	2. 8 6	0. 1 7 8
1 M 9	2. 7 1	0. 2 1 4
1 M 1 0	2. 2 5	0. 1 9 0
1 M 1 3	2. 5 1	0. 2 5 3
1 M 1 8	2. 6 3	0. 2 4 9
1 M 1 9	2. 7 6	0. 1 6 3
2 M 2	2. 8 9	0. 1 8 7
2 M 5	2. 9 2	0. 2 3 1
2 M 9	2. 8 0	0. 1 8 2
2 M 1 0	3. 2 1	0. 2 2 0
2 M 1 2	2. 8 7	0. 1 7 1
2 M 1 4	3. 1 1	(*)
2 M 1 5	3. 0 8	0. 1 2 3
J 5	4. 3 6	
J 1 3	2. 6 0	
J 1 9	2. 5 3	
N 5	3. 1 7	0. 1 6 0
N 8	2. 9 5	0. 1 9 2
N 9	3. 0 4	0. 1 7 6
N 1 0	2. 6 8	0. 1 5 8

(注) 1. 空欄は測定値なし  
2. (\*) はデータ記録失敗

表 4.4 引張り強度試験結果

試料名	引張り強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
K 3	37.4
K 9	34.2
K 1 2	31.1
K 1 5	32.6
1 L 4	39.5
2 L 6	33.7
2 L 1 3	55.4
2 L 1 6	38.6
1 M 3	45.7
1 M 6	43.4
1 M 1 5	28.0
2 M 1 1	44.7
2 M 1 6	32.1
N 1	31.5
N 7	38.1
N 1 2	25.3

表 4.5 材令係数補正後の推定圧縮強度

No	E. L (m)	平均反発硬度 (R o)	推定圧縮強度 (Kgf/cm <sup>2</sup> )	補正後の圧縮強度 (Kgf/cm <sup>2</sup> )
1	12.715	42.45	368	232
2	12.15	43.15	377	238
3	11.76	49.69	462	291
4	11.48	51.80	489	308
5	11.28	52.45	498	314

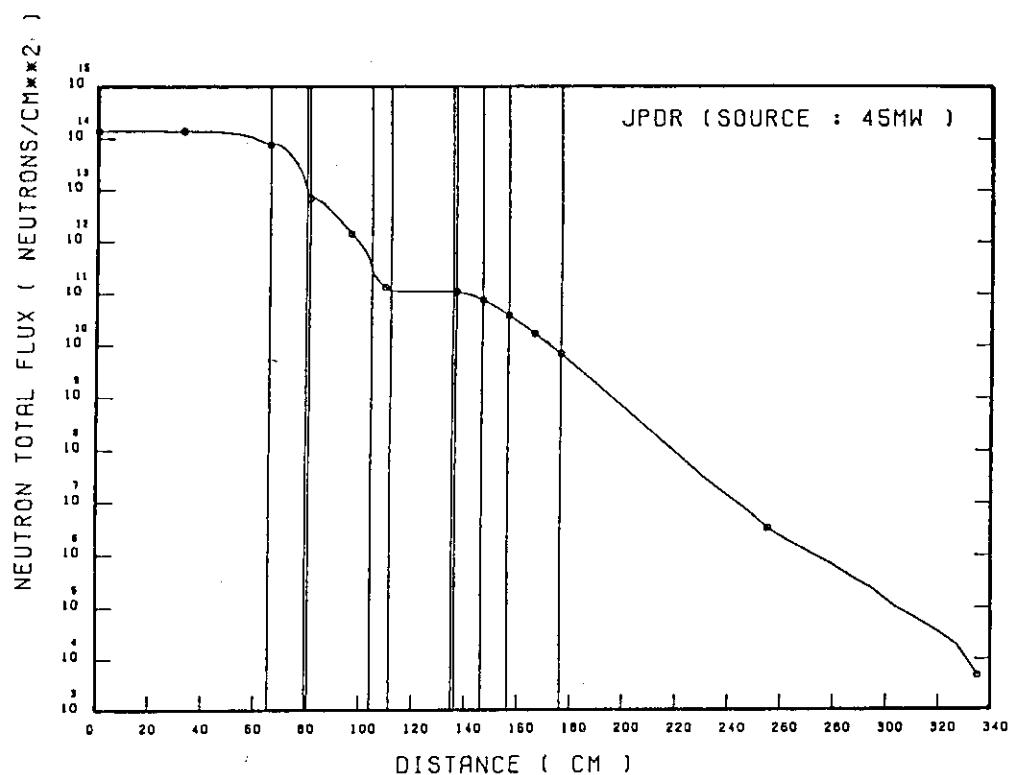


図 4.1 中性子束分布(有効炉心高さ147 cm, 高さ方向余弦分布)

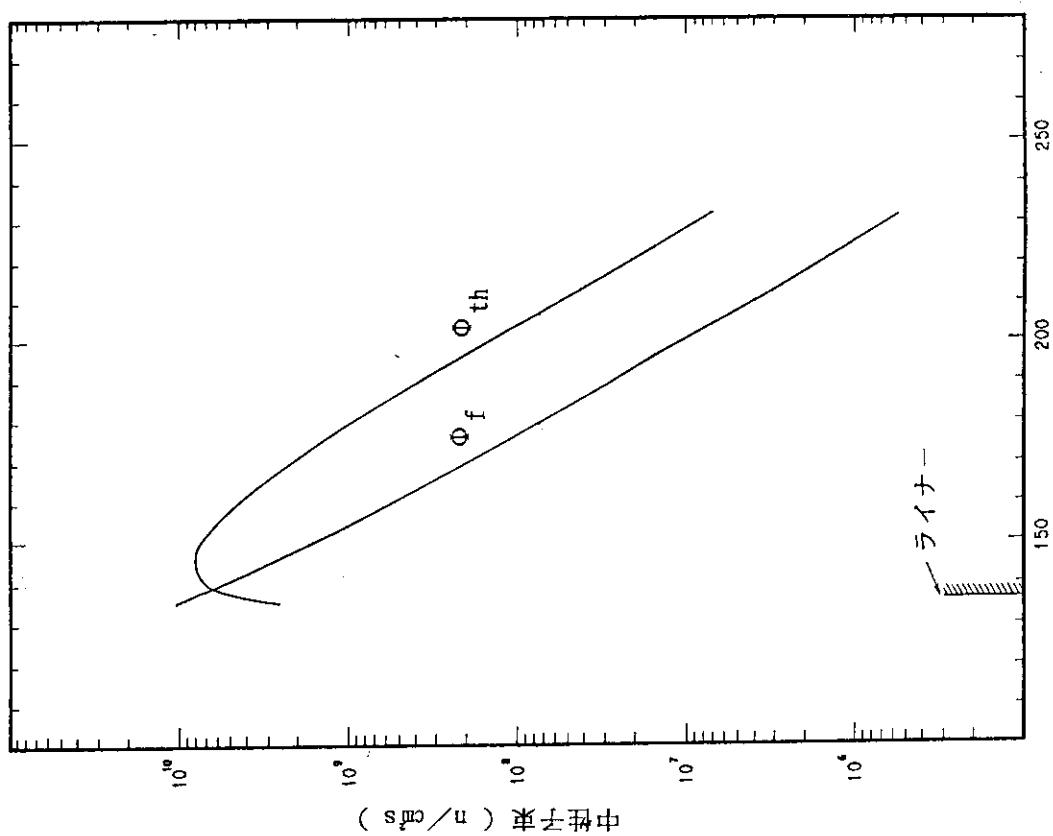


図 4.2 (2) H 及び L コアの全中性子束分布

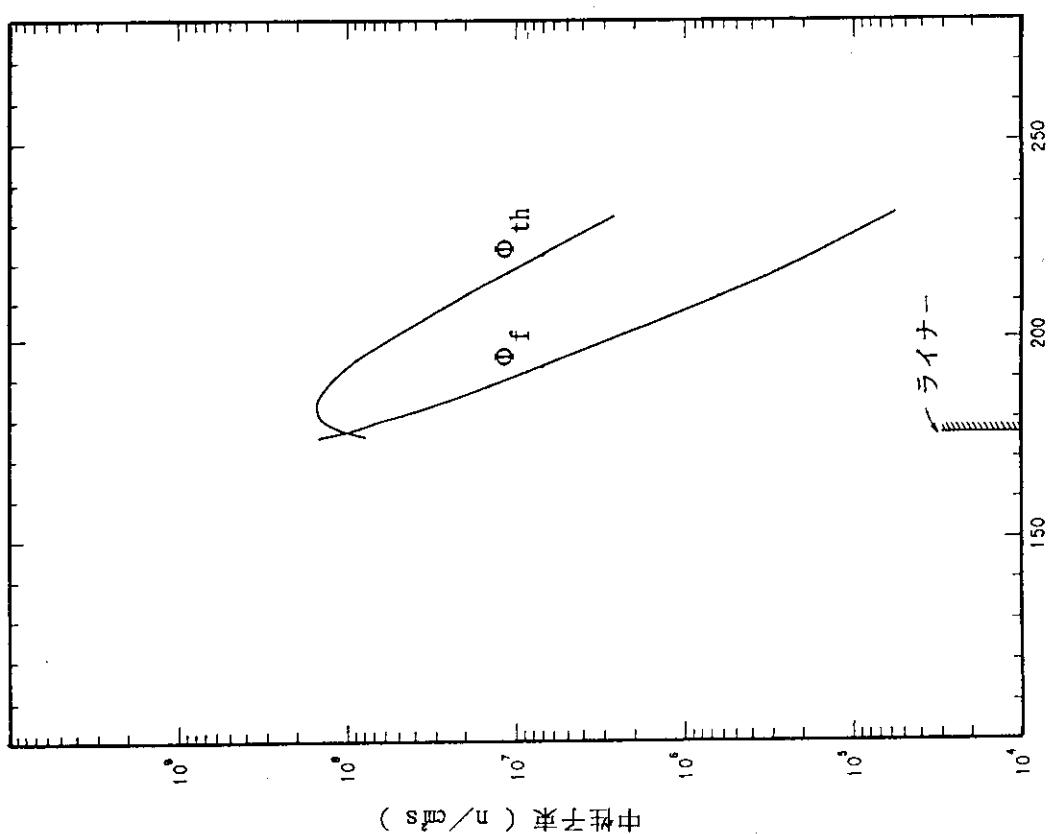


図 4.2 (1) G 及び K コアの全中性子束分布

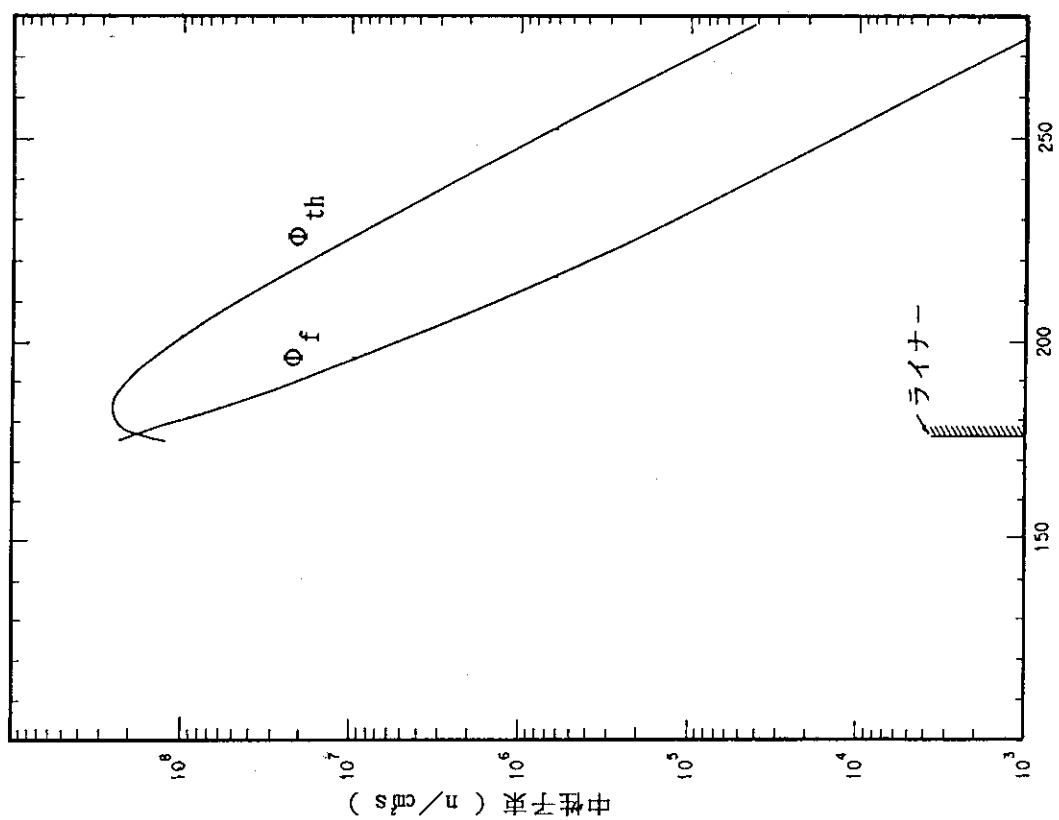


図 4.2(4) J 及び N コアの全中性子束分布

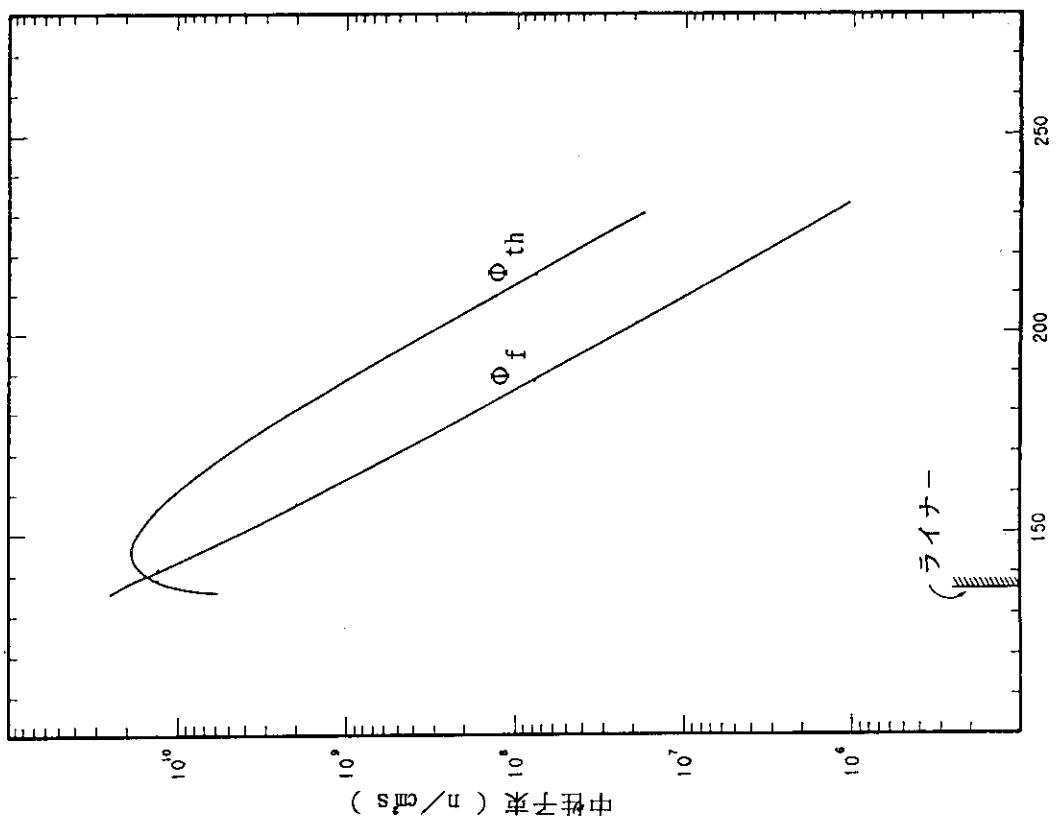


図 4.2(3) I 及び M コアの全中性子束分布

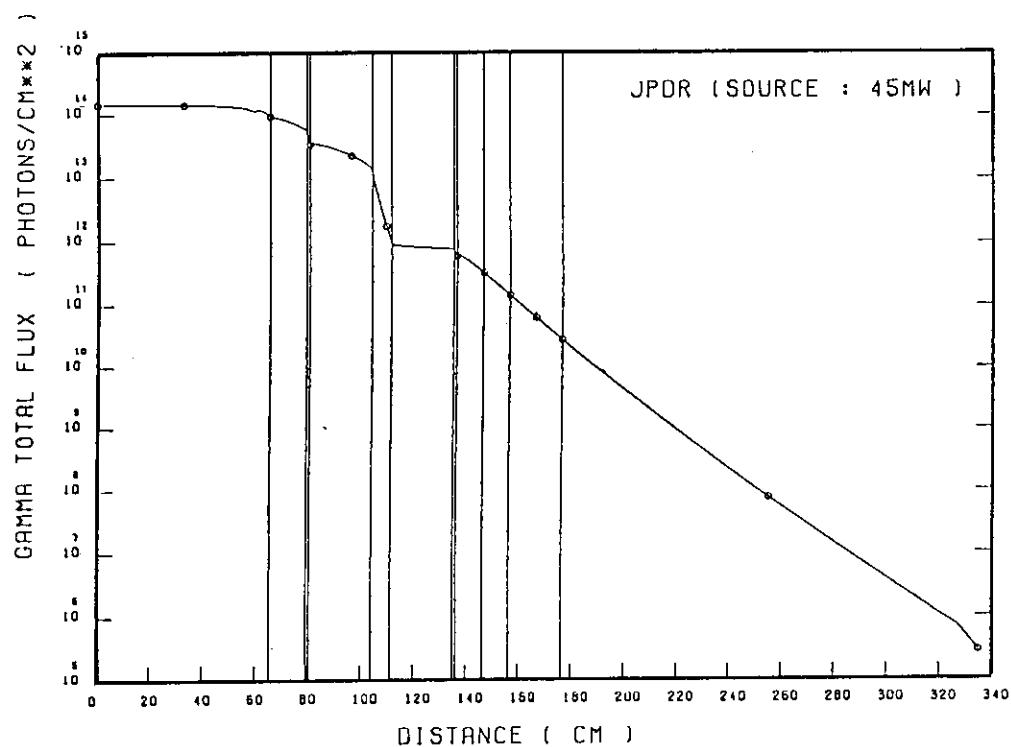


図 4.3 ガンマ線分布（一次ガンマ線+二次ガンマ線）  
(有効炉心高さ 147 cm, 高さ方向余弦分布)

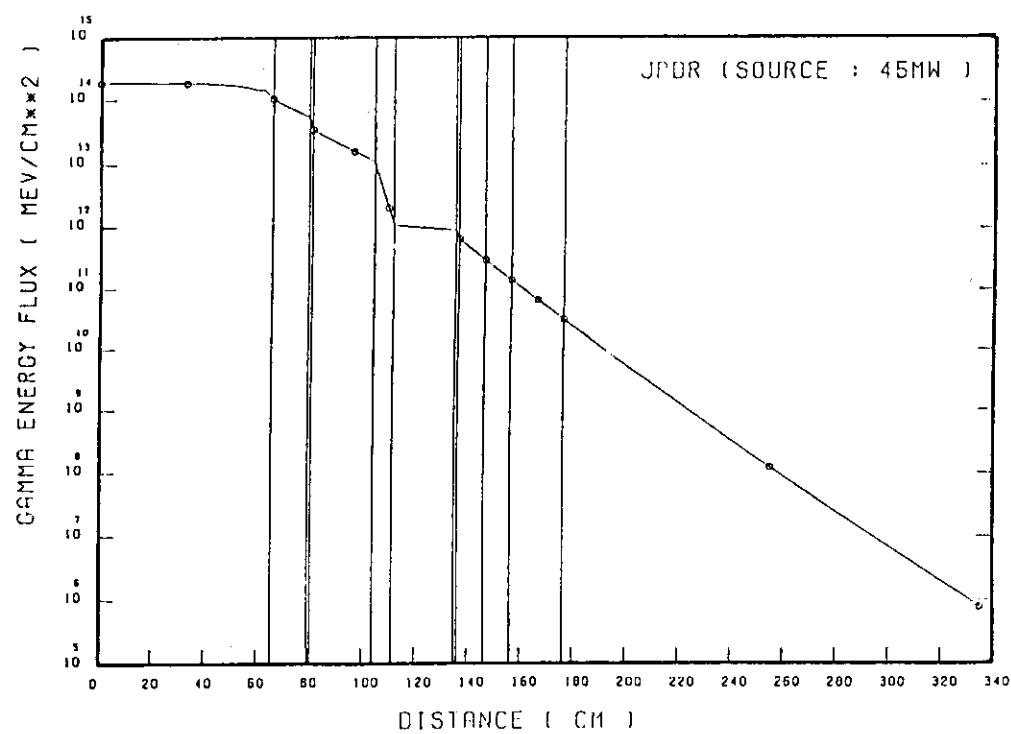


図 4.4 ガンマ線強度分布（一次ガンマ線+二次ガンマ線）  
(有効炉心高さ 147 cm, 高さ方向余弦分布)

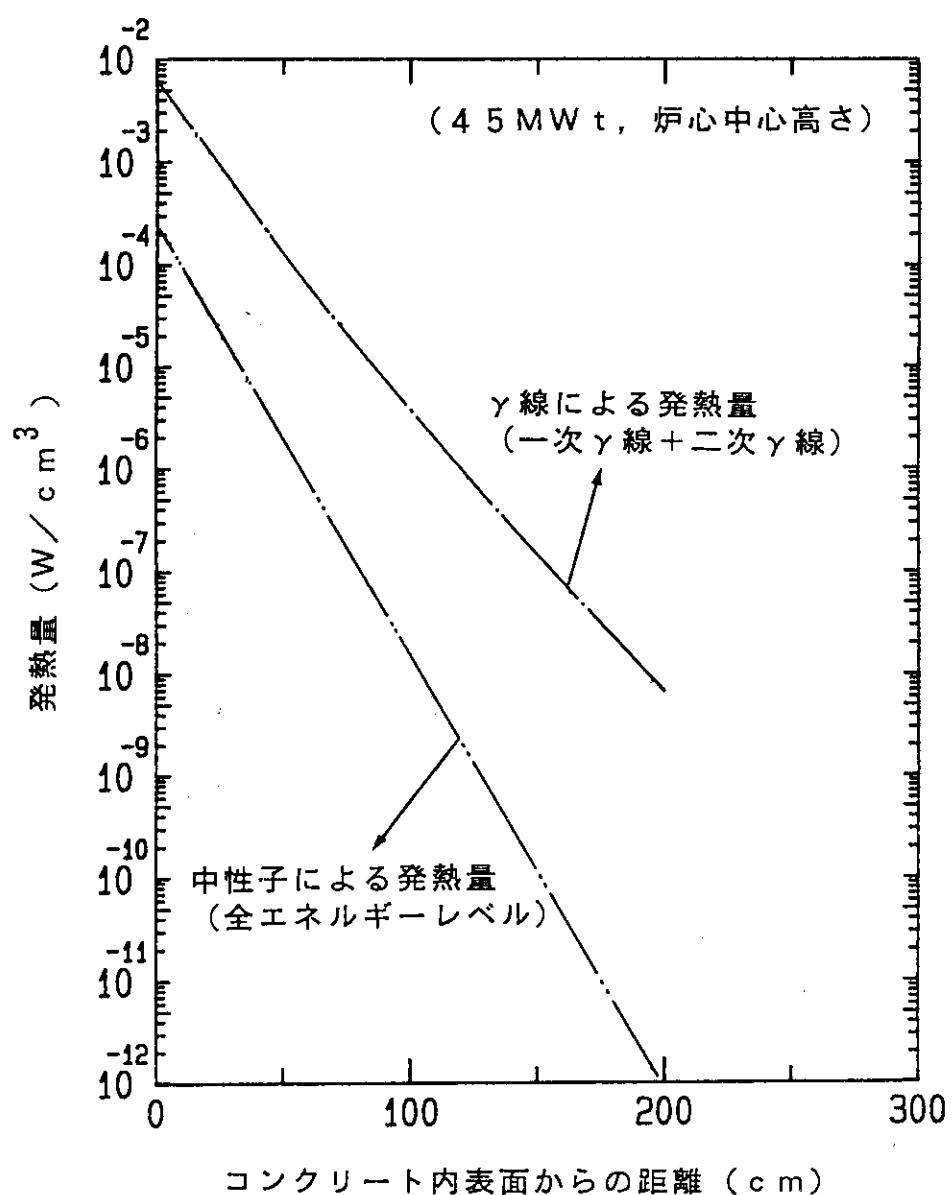


図 4.5 J P D R 生体遮蔽コンクリートのガンマ線及び中性子による  
発熱量とコンクリート内表面からの距離

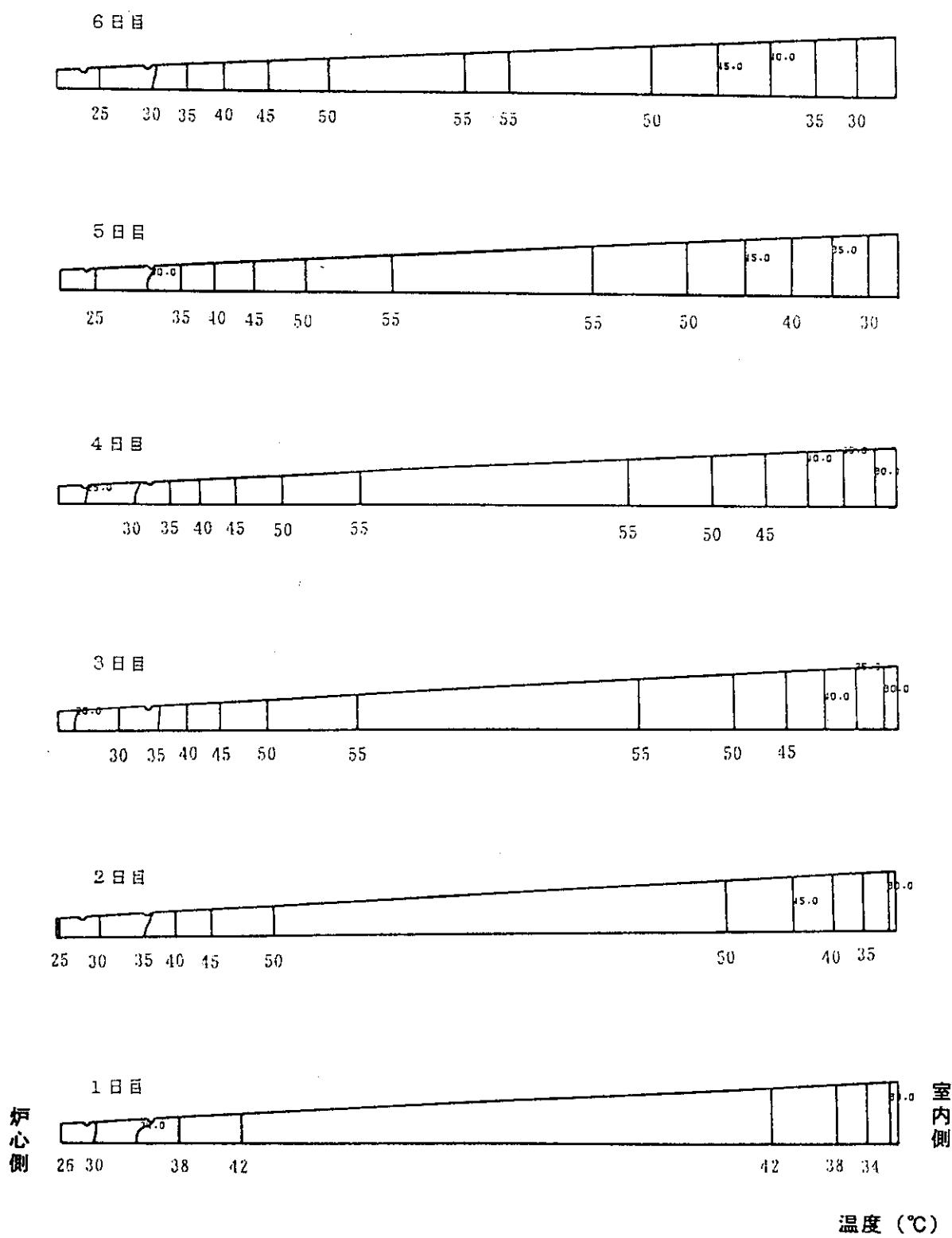


図 4.6(1) コンクリート打設後の温度分布

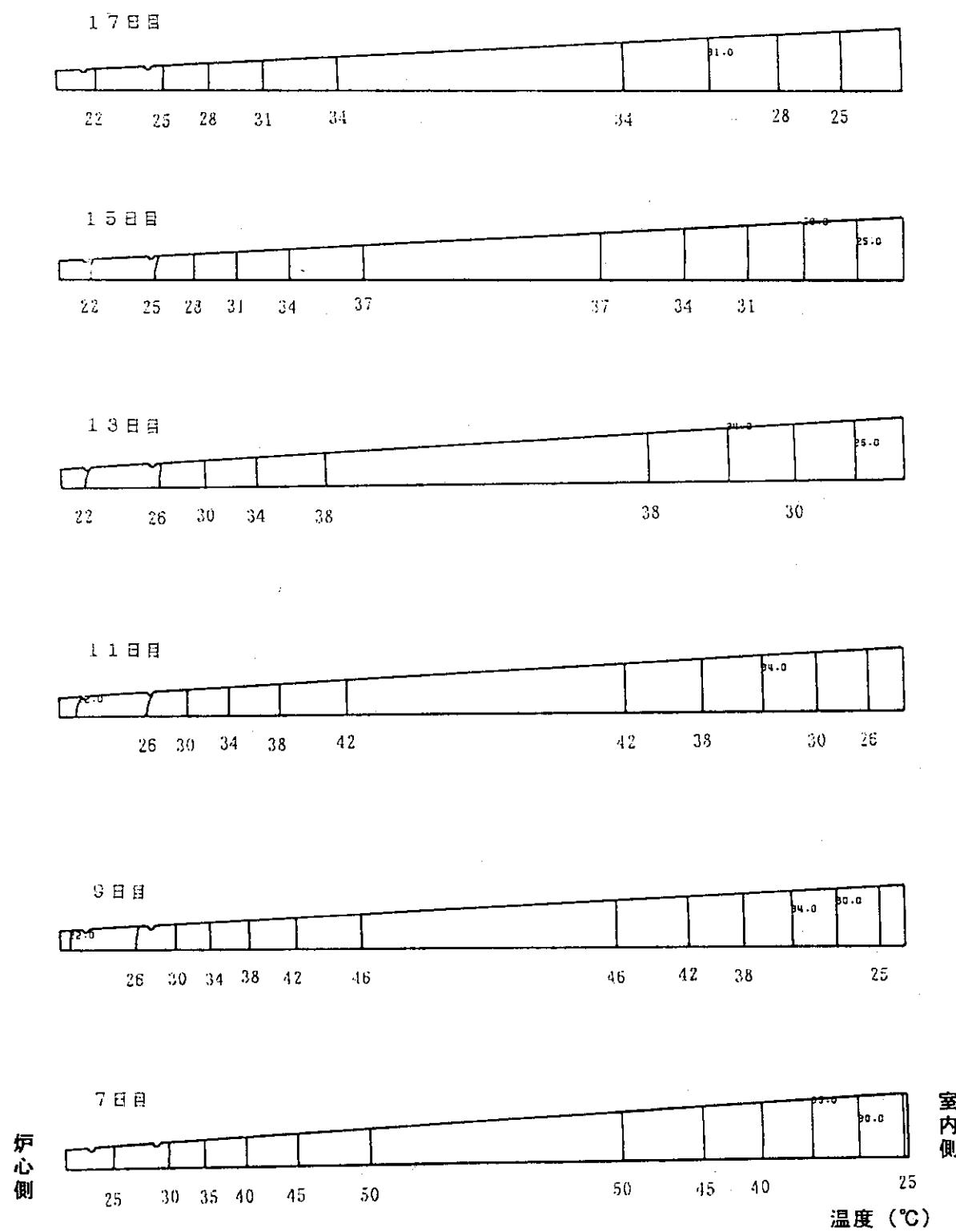
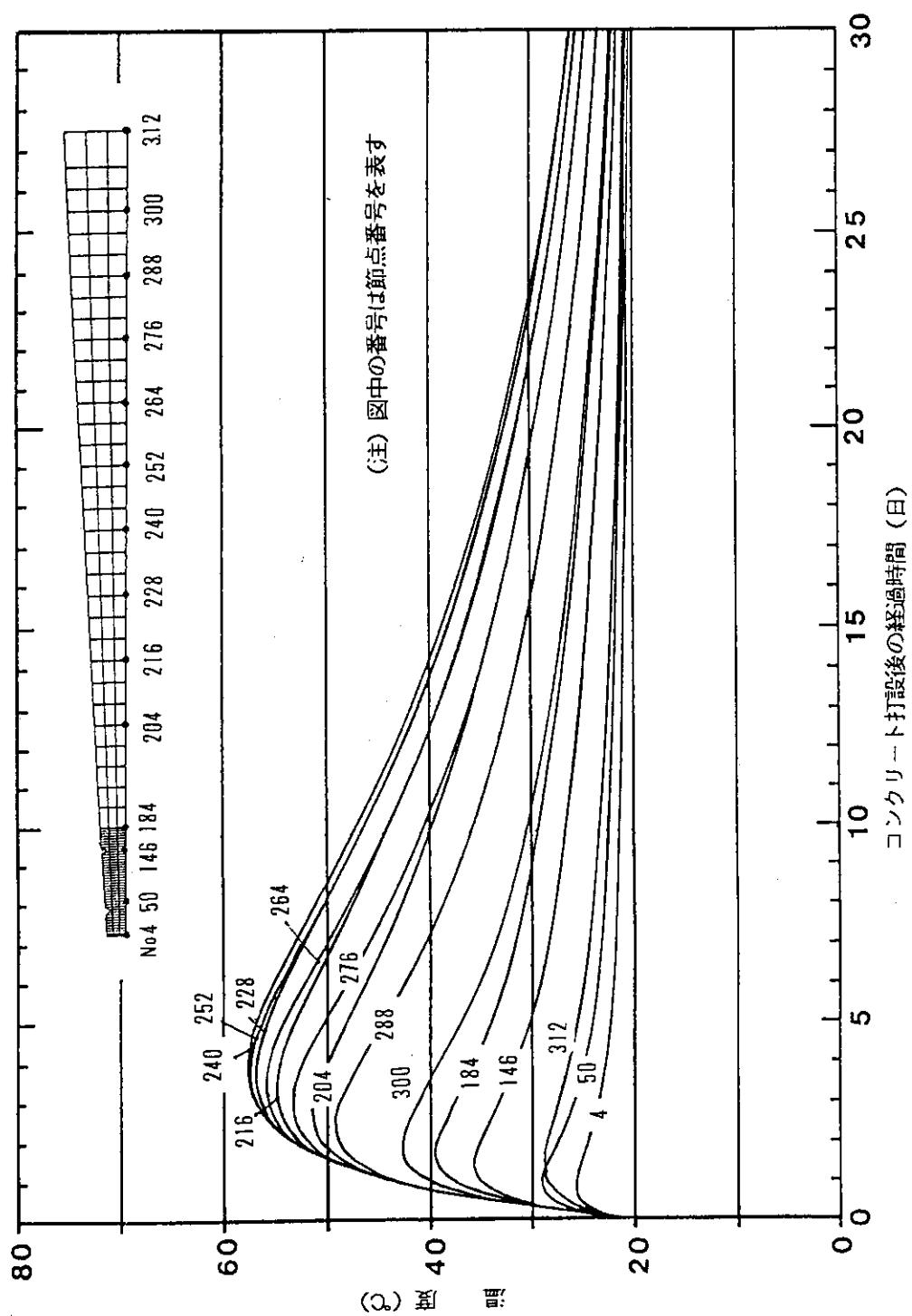


図 4.6(2) コンクリート打設後の温度分布



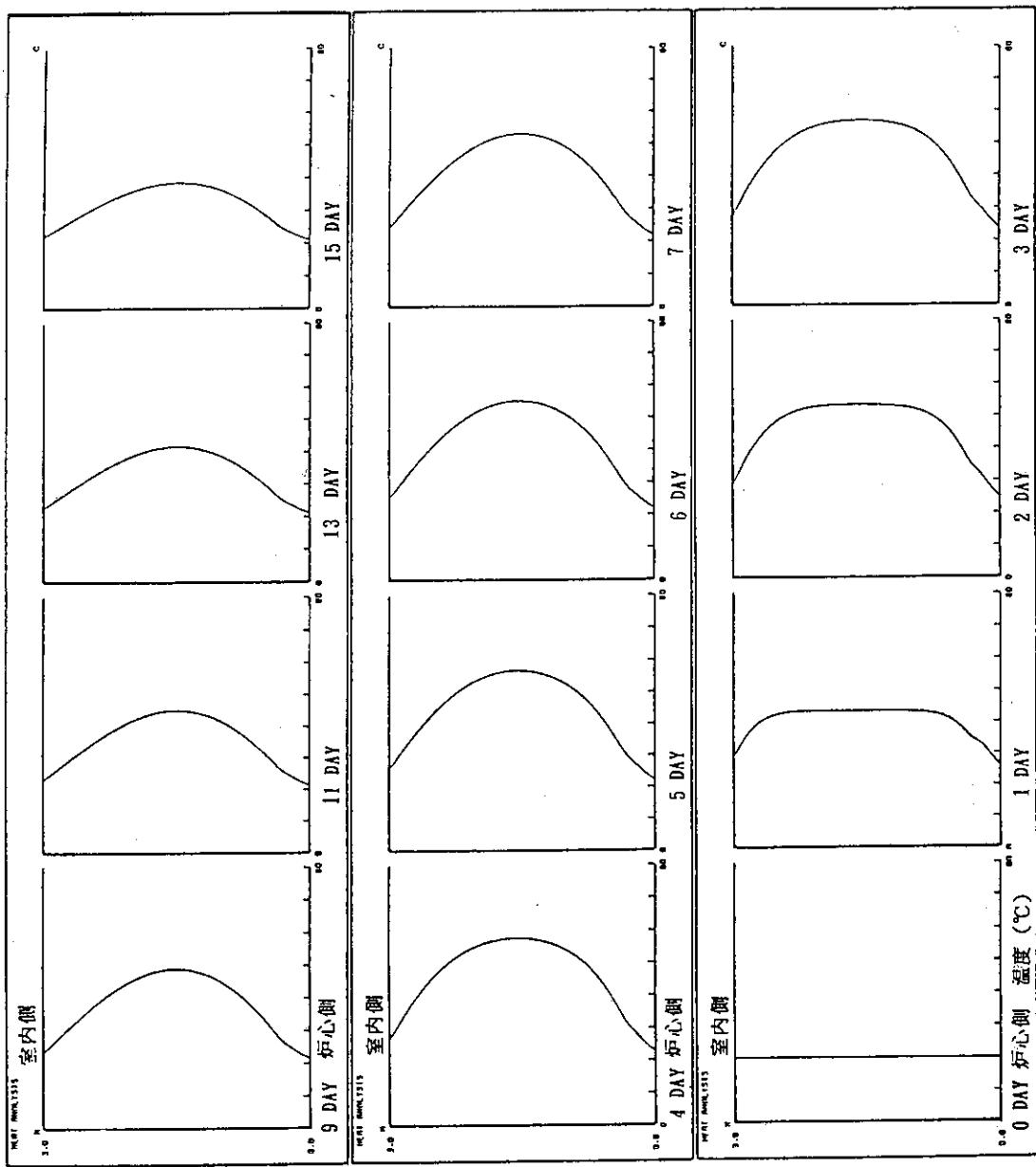


図 4.8(1) コンクリート打設後の厚さ方向の温度分布

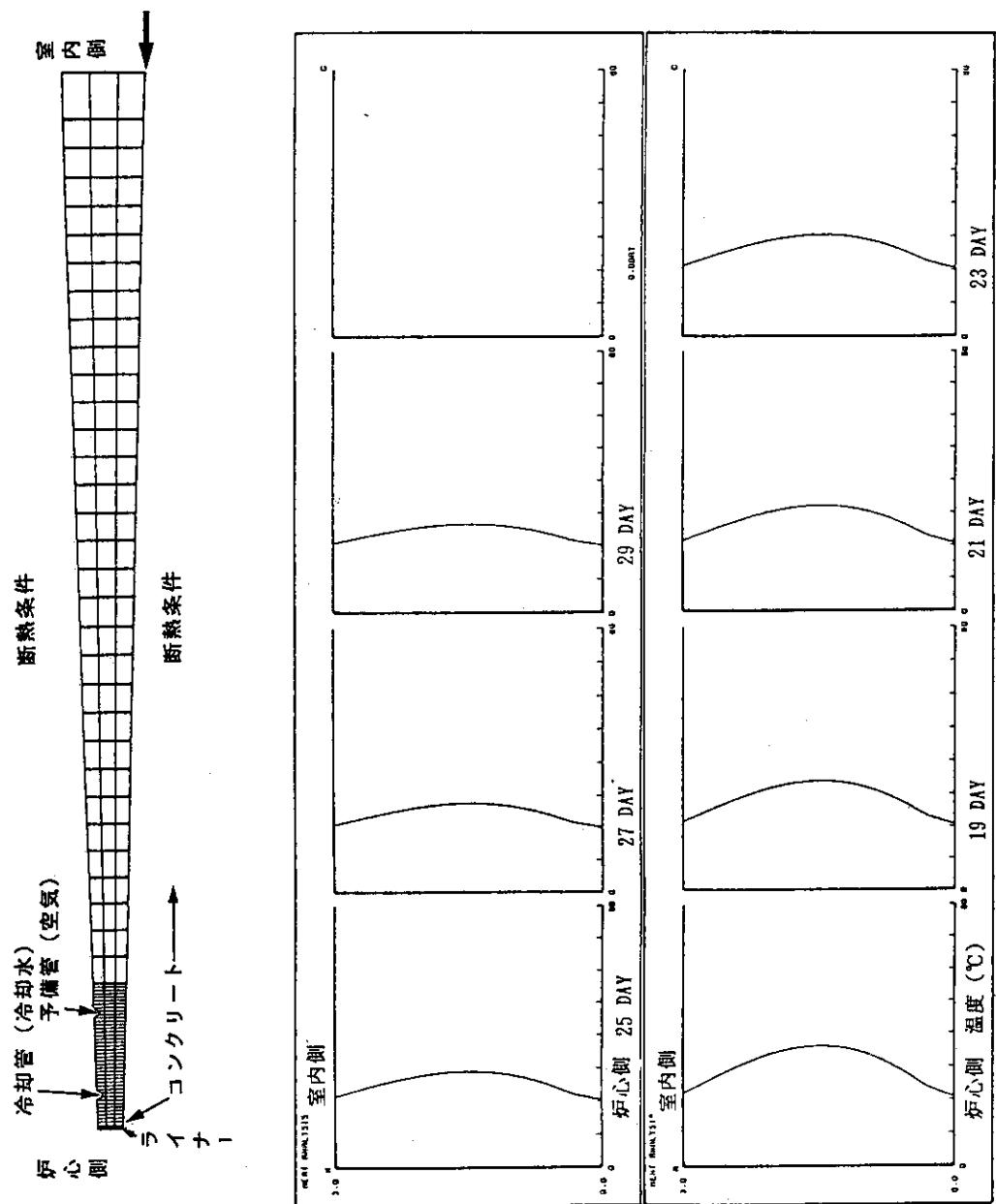


図 4.8(2) コンクリート打設後の厚さ方向の温度分布

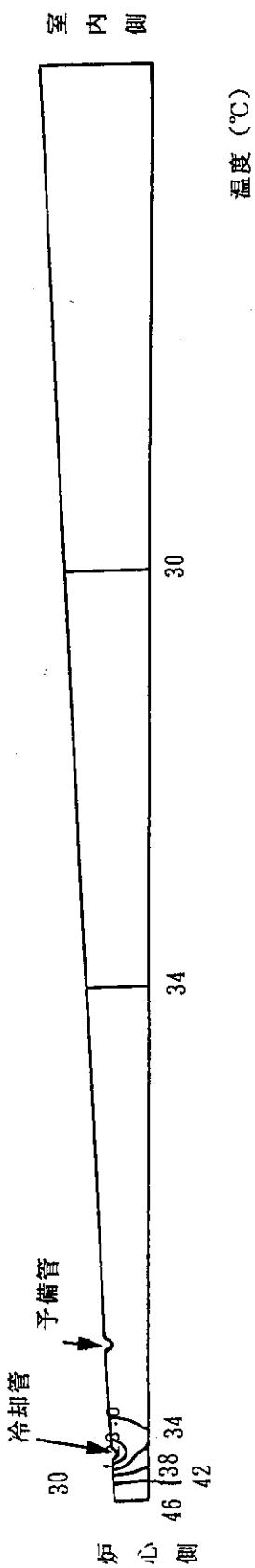


図 4.9 運転時の生体遮蔽コントリー卜内の等温線図

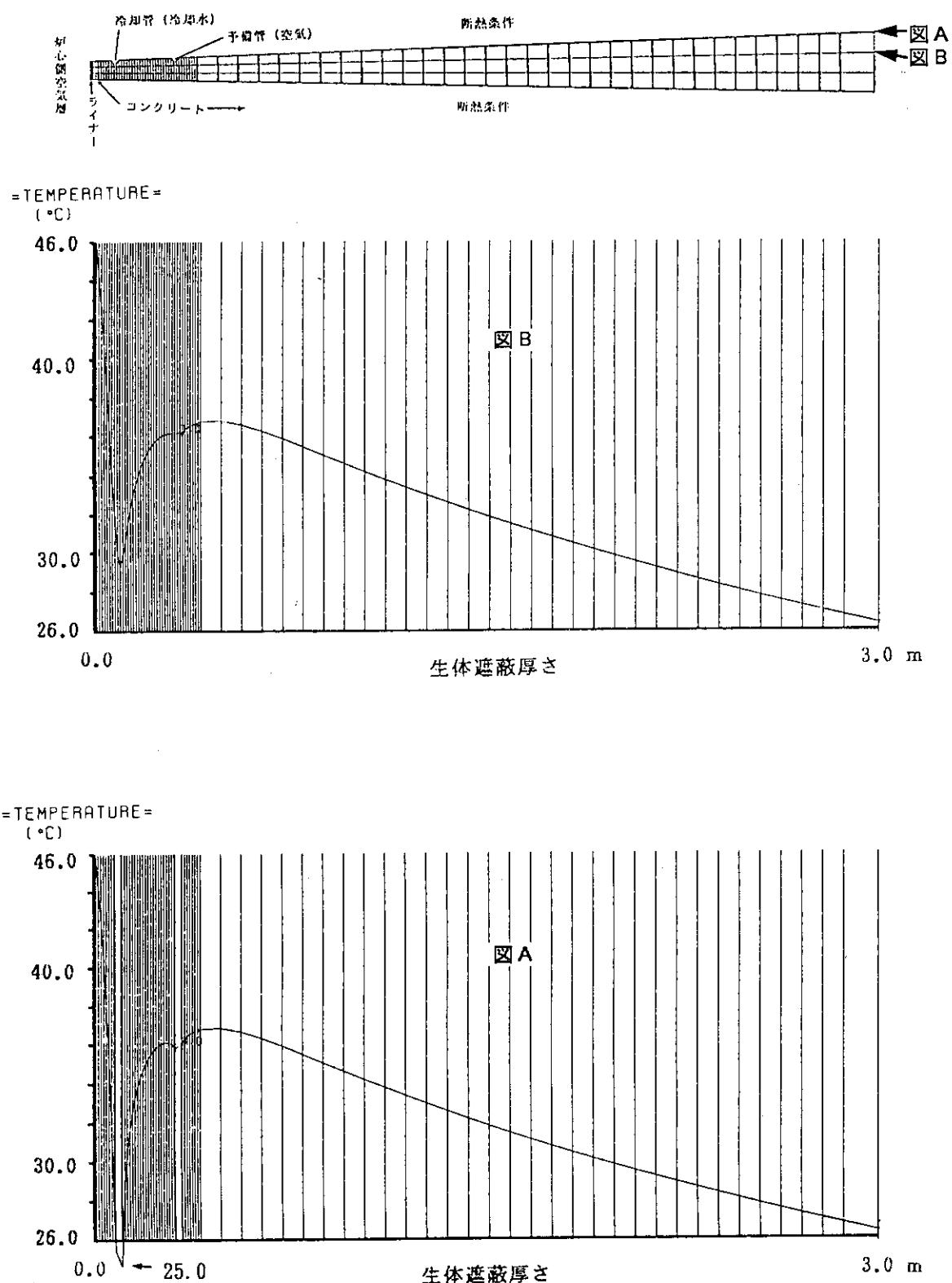


図 4.10(1) 運転時の生体遮蔽コンクリート厚さ方向の温度分布

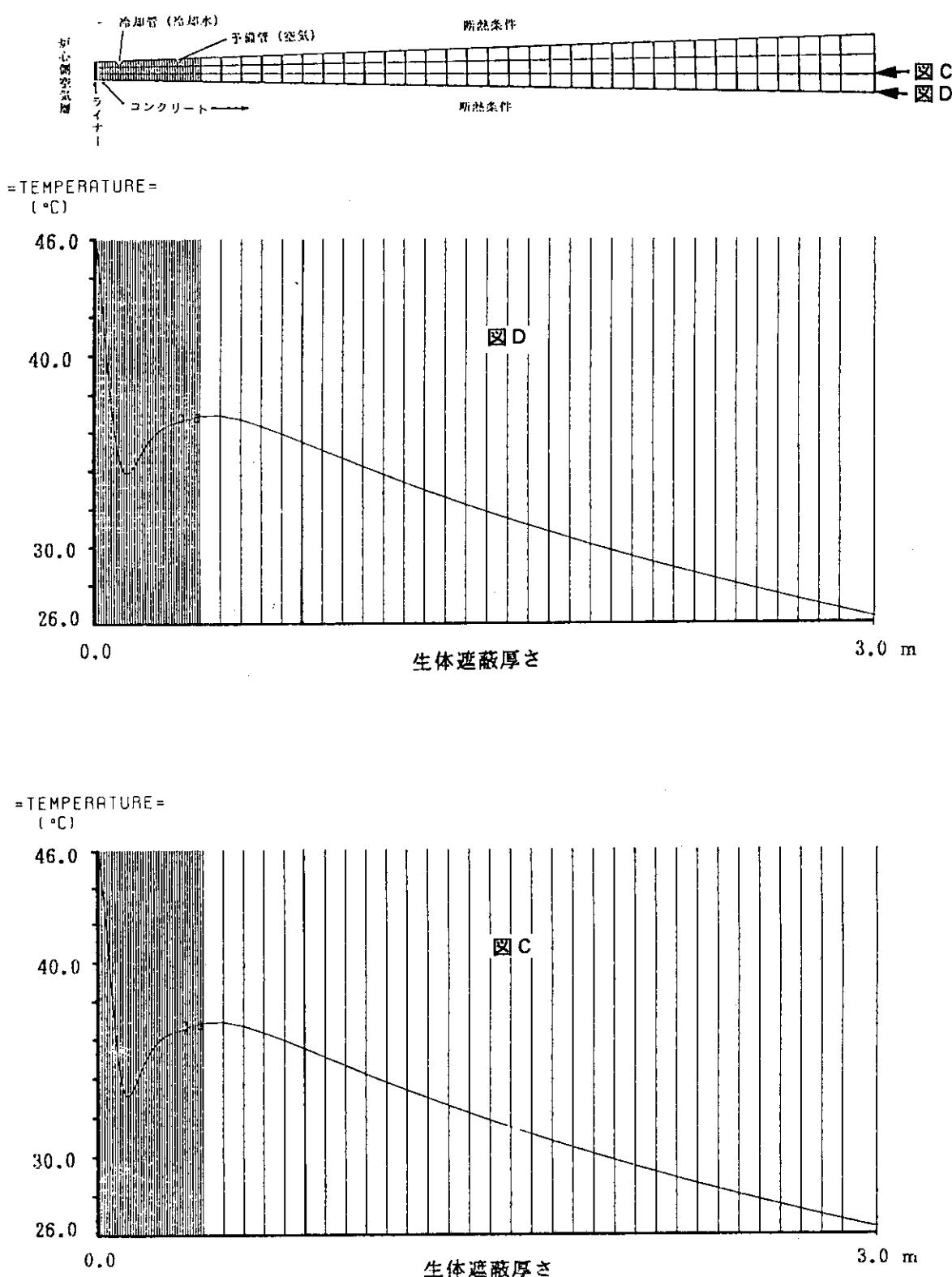


図 4.10(2) 運転時の生体遮蔽コンクリート厚さ方向の温度分布

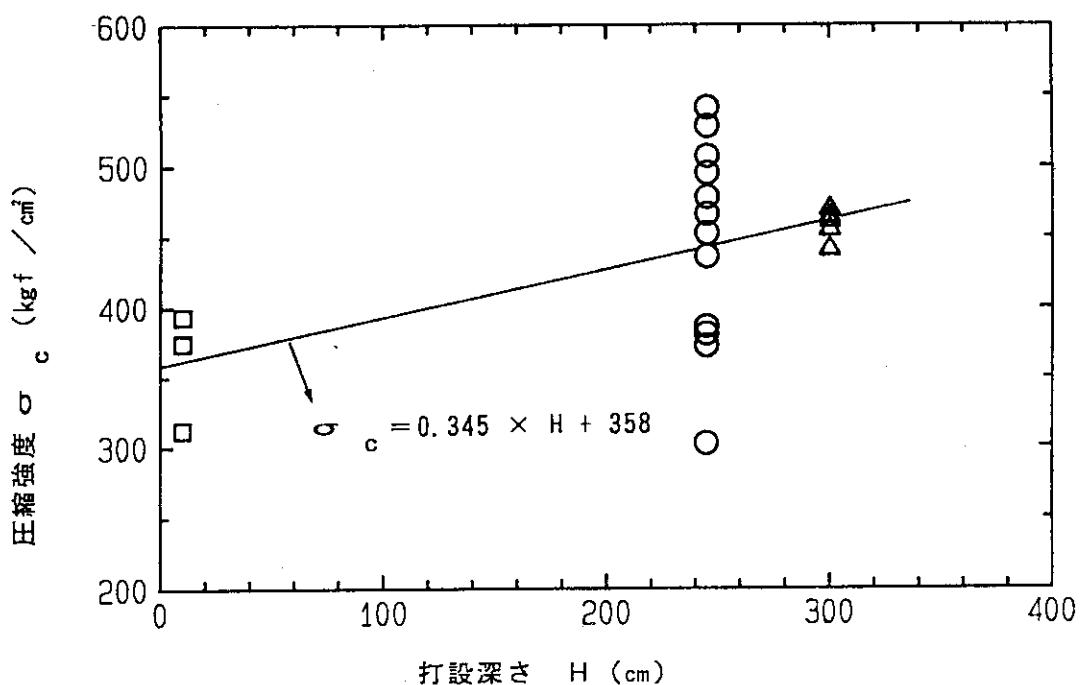


図 4.11 J P D R 生体遮蔽コンクリートの圧縮強度と打設深さの関係  
 (高速中性子照射量が $10^{13}/\text{cm}^2$ 未満のデータを使用)

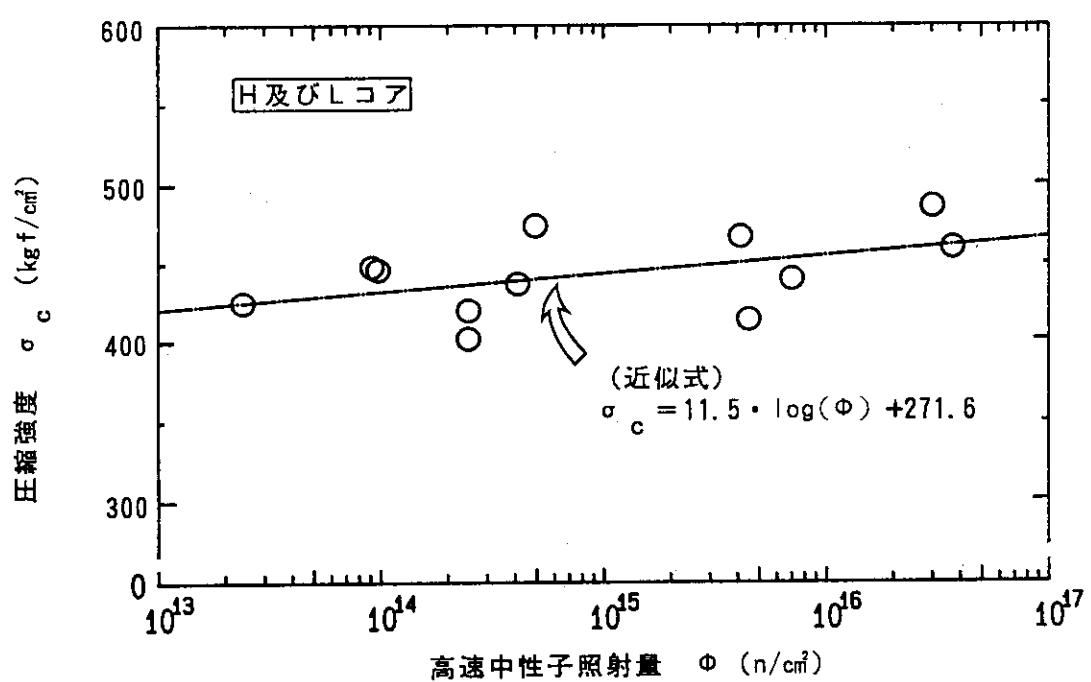


図 4.12 同一打設深さでの高速中性子照射量と圧縮強度 (H, Lコア)

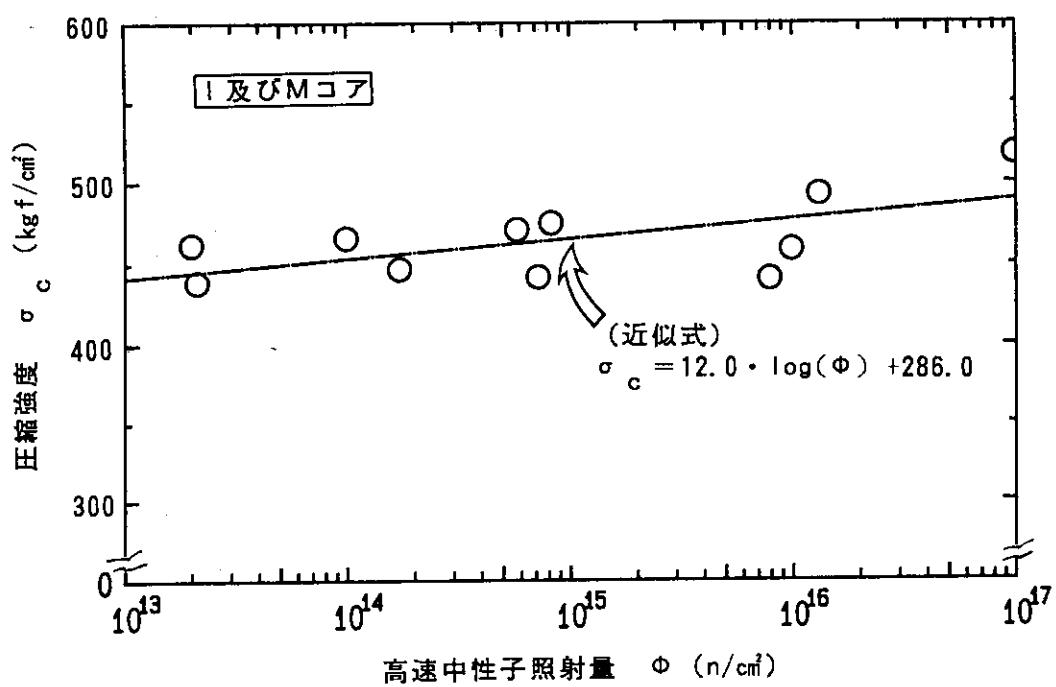


図 4.13 同一打設深さでの高速中性子照射量と圧縮強度（I, M コア）

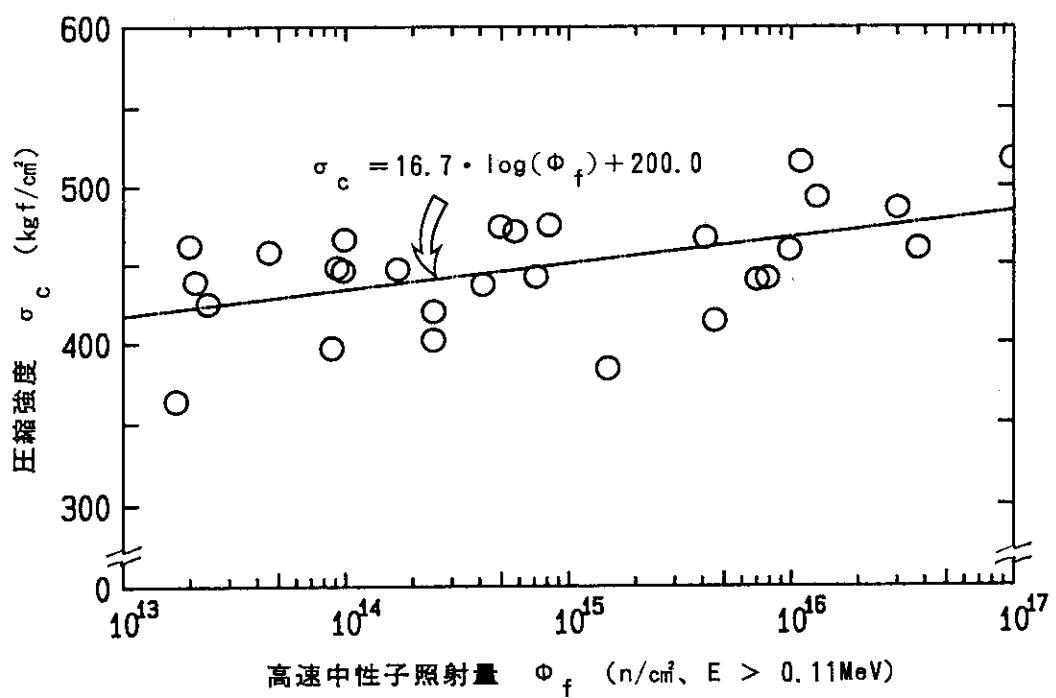


図 4.14 高速中性子照射量と圧縮強度

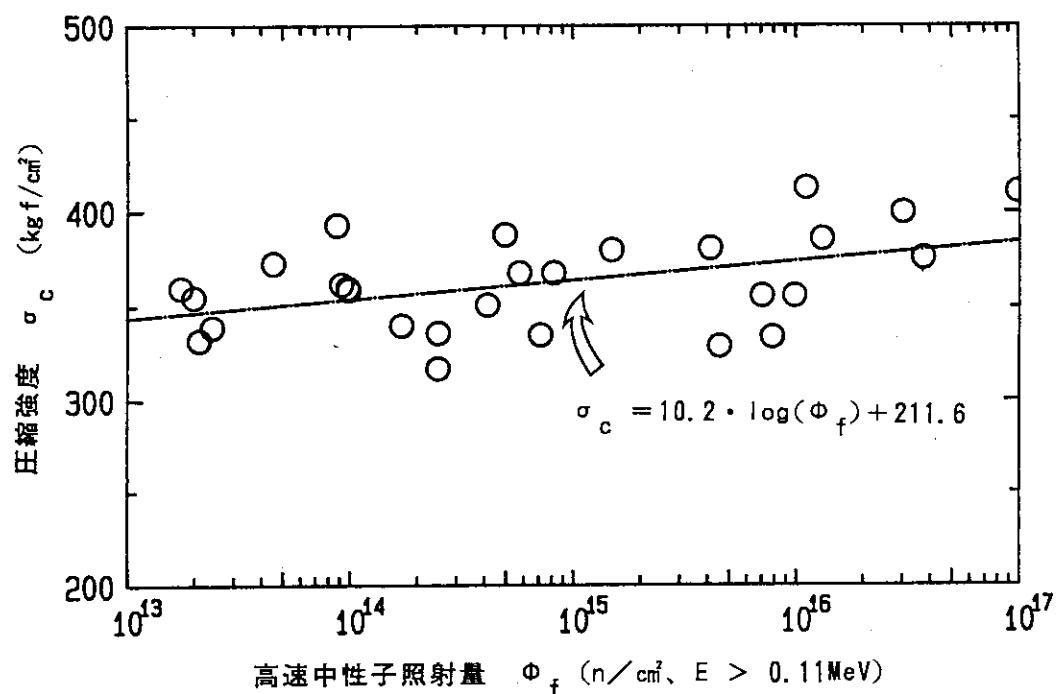
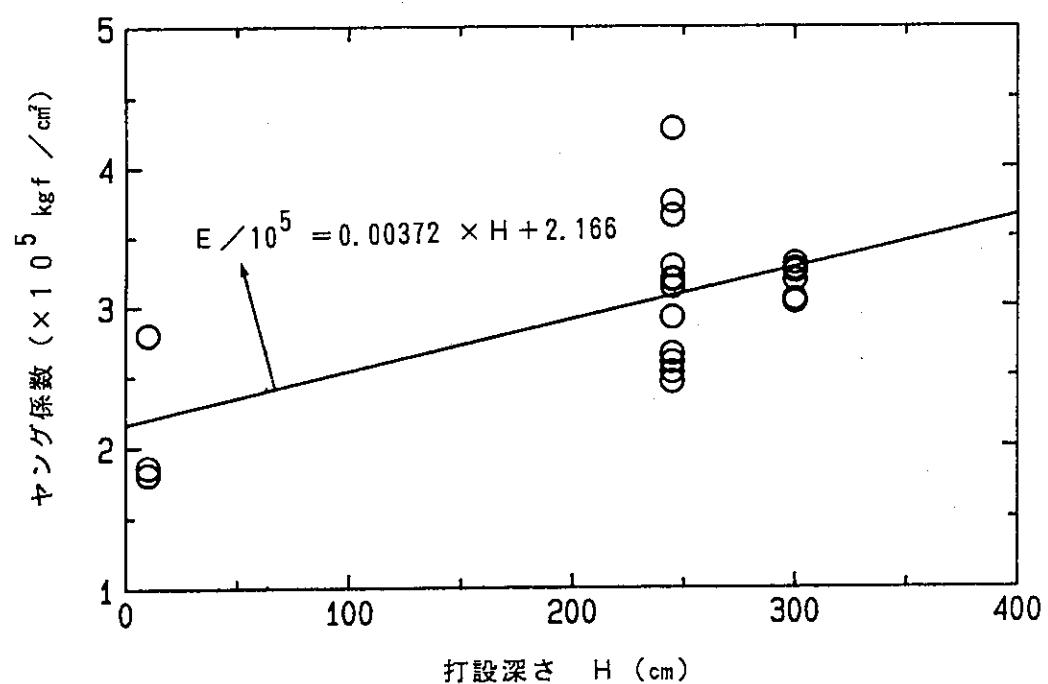


図 4.15 高速中性子照射量と打設深さ 0 cm換算の圧縮強度

図 4.16 J P D R 生体遮蔽コンクリートのヤング係数と打設深さの関係  
(高速中性子照射量が  $10^{13} / \text{cm}^2$  未満のデータを使用)

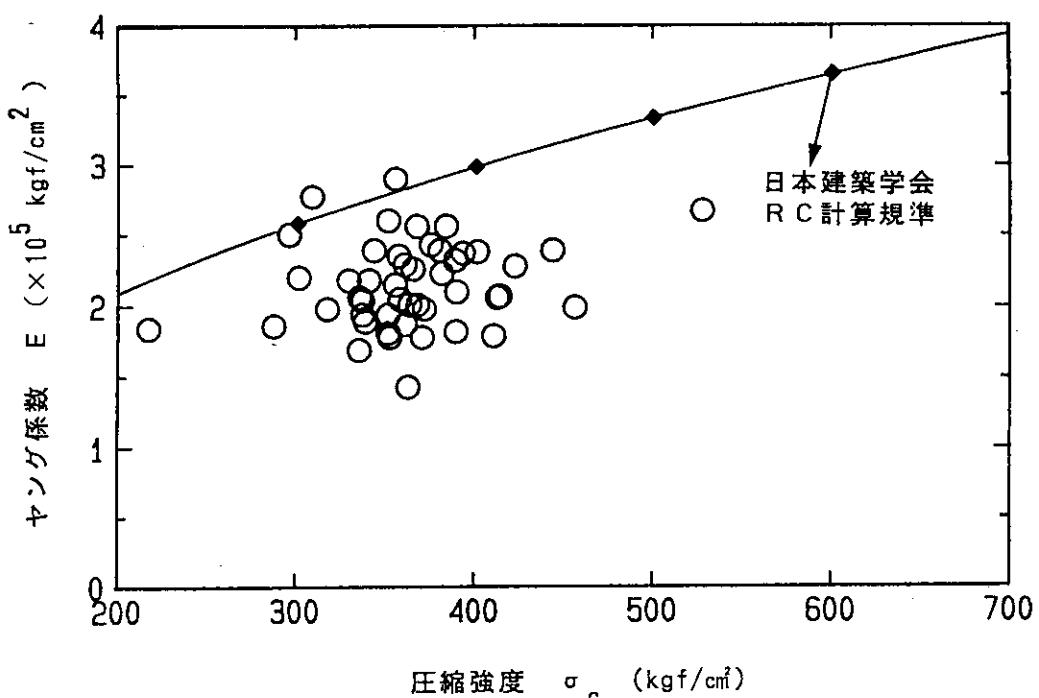


図 4.17 J P D R 生体遮蔽コンクリートのヤング係数と圧縮強度の関係

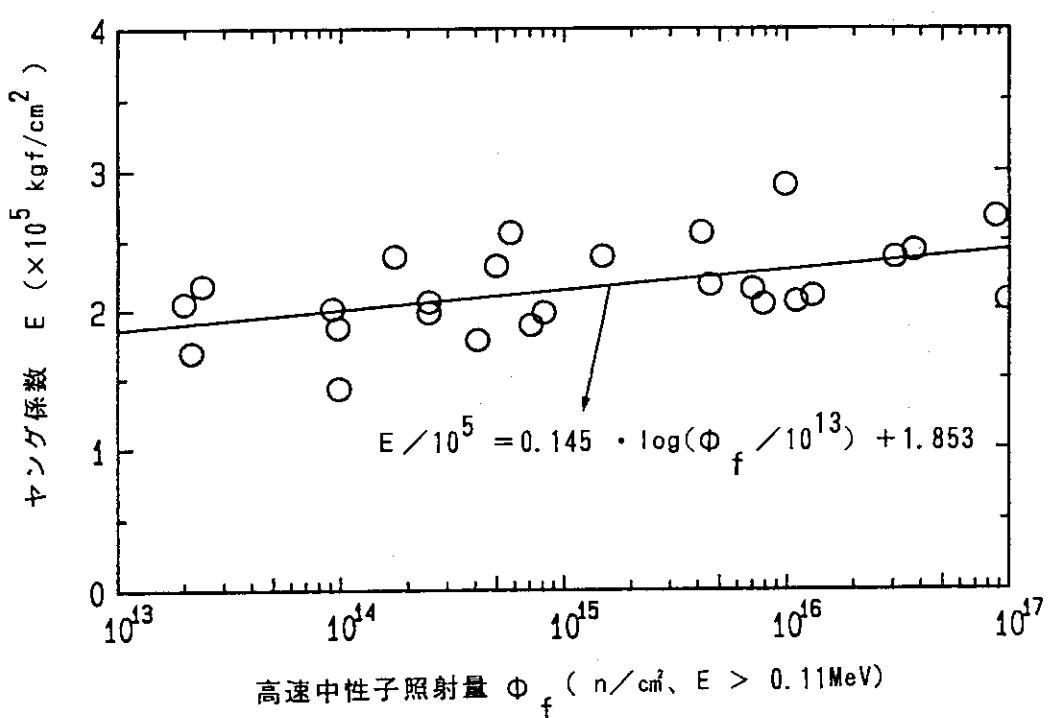


図 4.18 ヤング係数と高速中性子照射量の関係

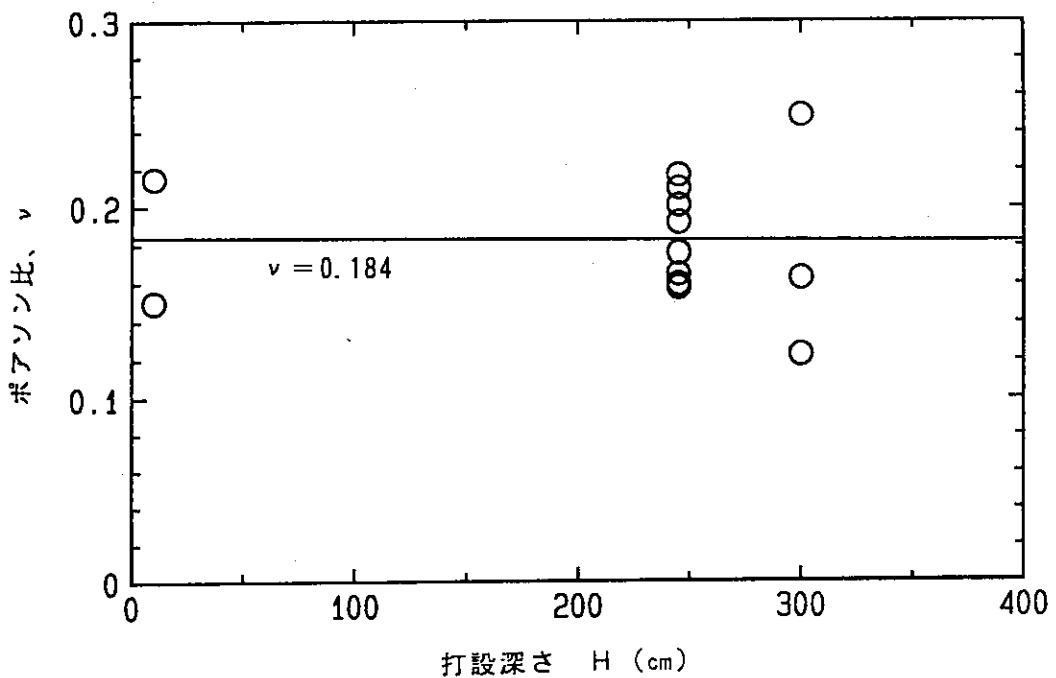


図 4.19 J P D R 生体遮蔽コンクリートのポアソン比と打設深さの関係  
(高速中性子照射量が $10^{13}/\text{cm}^2$ 未満のデータを使用)

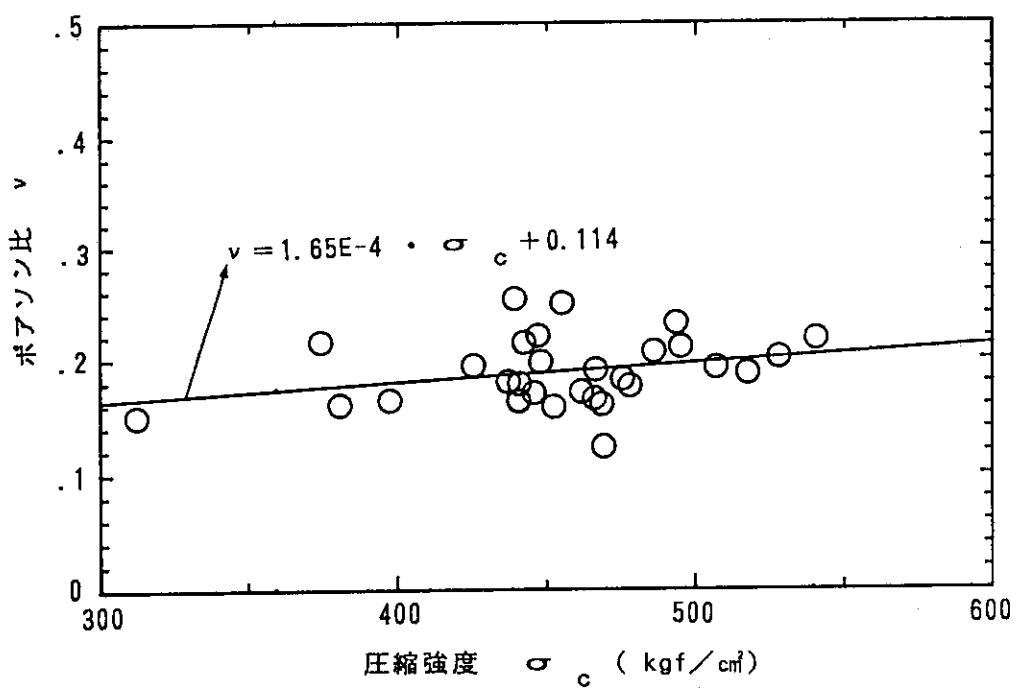


図 4.20 J P D R 生体遮蔽コンクリートのポアソン比と圧縮強度の関係

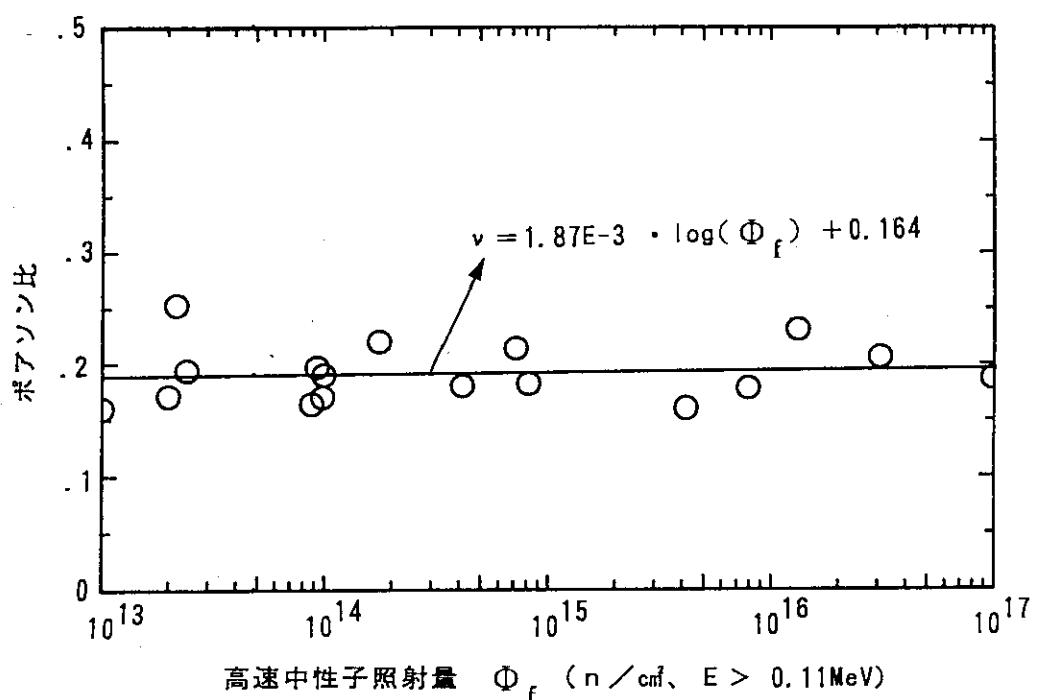


図 4.21 J P D R 生体遮蔽コンクリートのポアソン比と高速中性子照射量の関係

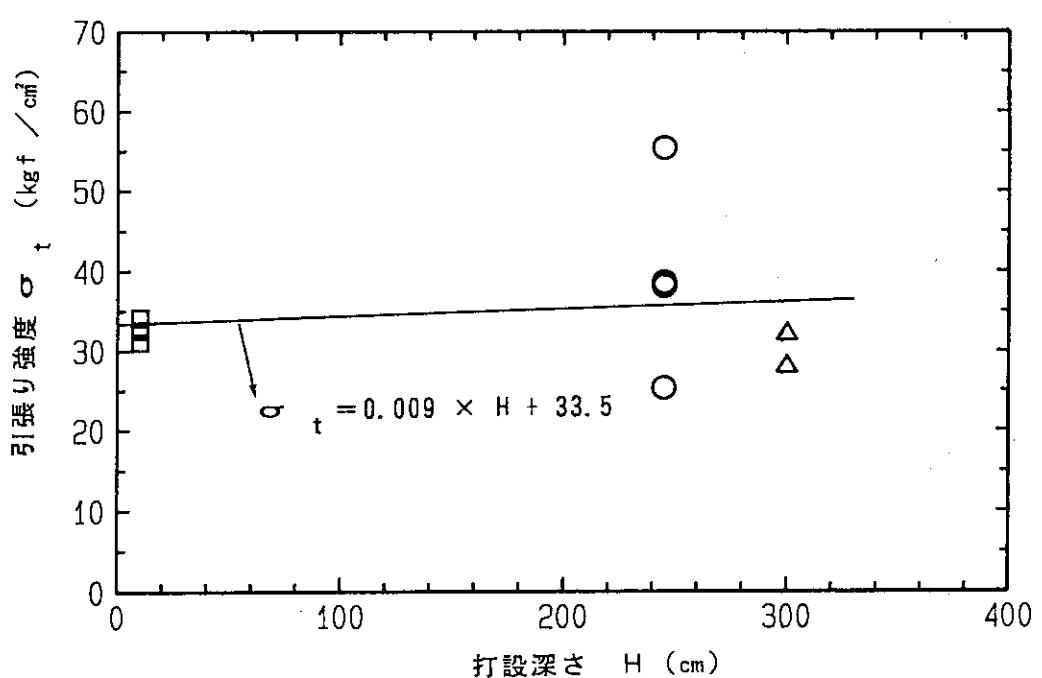


図 4.22 J P D R 生体遮蔽コンクリートの引張り強度と高速中性子照射量の関係  
 (高速中性子照射量が $10^{13} \text{ n/cm}^2$  以上のデータを使用)

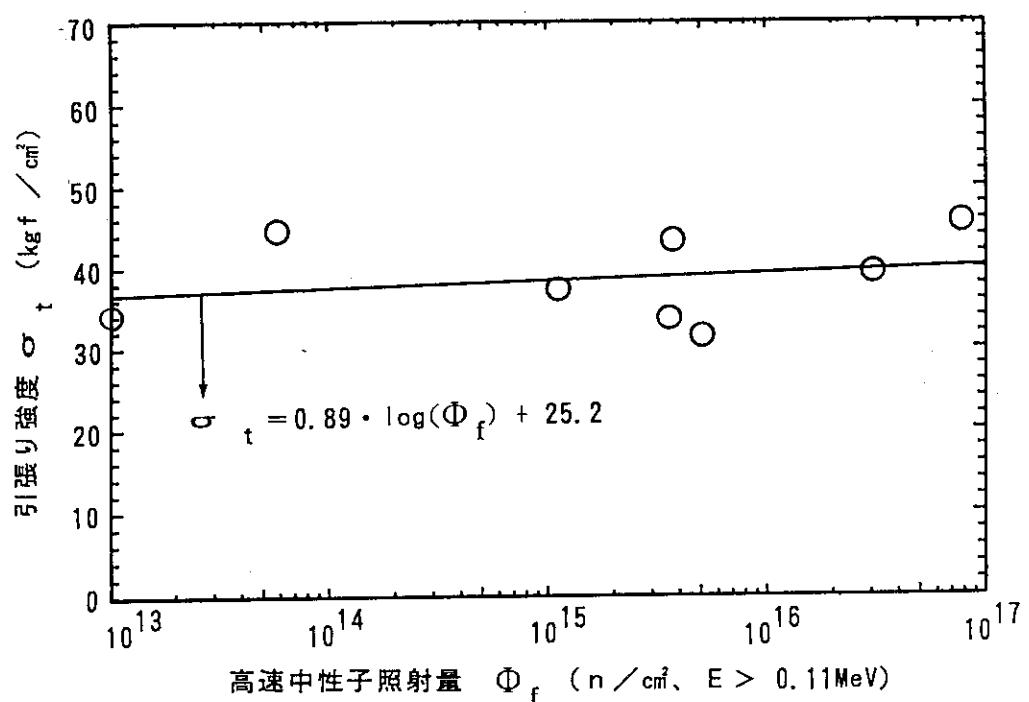


図 4.23 J P D R 生体遮蔽コンクリートの引張り強度と高速中性子照射量の関係  
(高速中性子照射量が  $10^{13}$  n/cm<sup>2</sup> 以上のデータを使用)

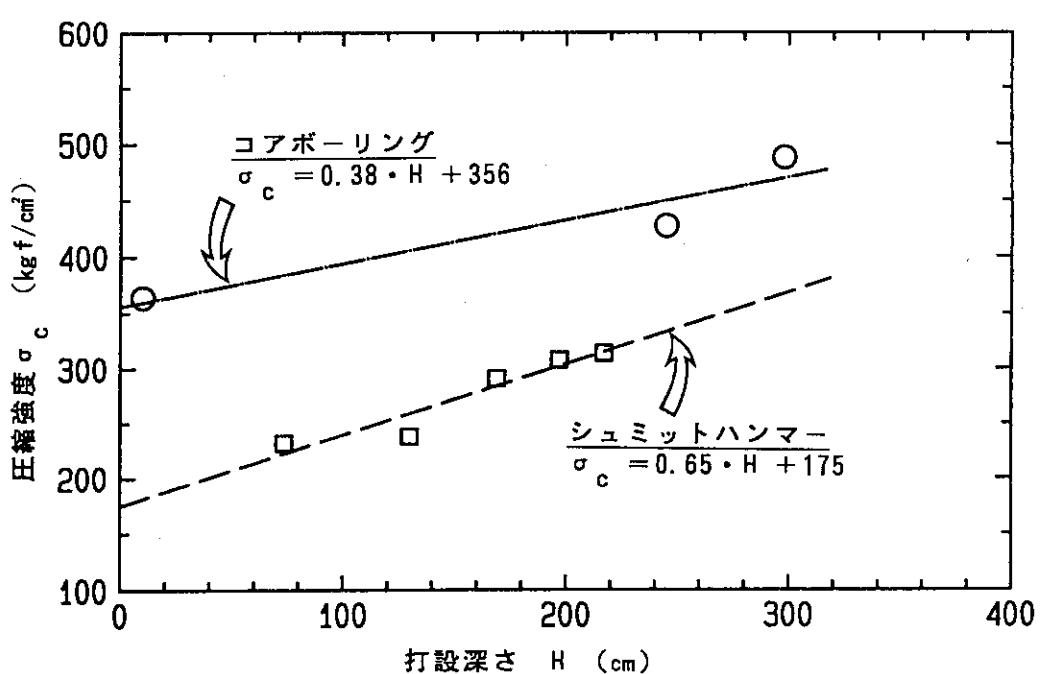


図 4.25 J P D R 生体遮蔽コンクリートの圧縮強度と打設深さの関係  
(外壁面のコアーボーリング及びシュミットハンマー・データ)

測定位置 No. 1 E. L=12.715

44	44	40	40	44
39	43	41	42	42
42	42	45	42	43
43	46	44	41	42
平均反発硬度				$Ro=42.45$

測定位置 No. 2 E. L=12.15

44	45	44	43	42
42	42	41	41	40
49	42	44	43	43
44	42	44	44	44
平均反発硬度				$Ro=43.15$

測定位置 No. 3 E. L=11.76

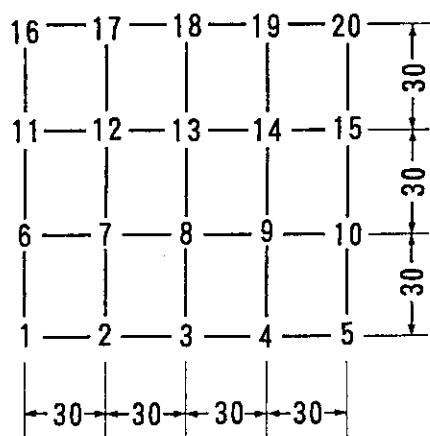
55	44	46	45	50
56	49	50	45	50
56	47	45	53	49
58	48	48	52	47
平均反発硬度				$Ro=49.65$

測定位置 No. 4 E. L=11.48

50	49	51	55	52
52	51	47	56	52
52	48	46	54	54
55	53	51	54	54
平均反発硬度				$Ro=51.80$

測定位置 No. 5 E. L=11.28

56	52	55	55	55
53	52	53	54	56
50	47	53	52	53
51	45	51	50	56
平均反発硬度				$Ro=52.45$



反発硬度測定間隔

(単位 : mm)

図 4.24 シュミットハンマー測定間隔及び反発硬度測定結果

## 5. ま と め

J P D R 生体遮蔽コンクリートを対象にして行った経年変化に関する強度試験を行い、中性子及びガンマ線の照射を受けた実構造物の経年変化の実態の把握を試みた結果、次の点が明らかになった。

- (1) 商業用発電炉の寿命を40年と仮定した場合の寿命末期の照射量に相当する、最大  $10^{17} n/cm^2$  の高速中性子照射量を受けたコンクリートでは圧縮強度のわずかな上昇が認められた。その量は、照射量1桁当たり約  $1.2 kgf/cm^2$  である。
- (2) この圧縮強度は、建設当時の調合設計をもとに試算した初期の調合強度を平均で20%以上も上回っていることも確認され、圧縮強度低下を示す徵候は認められない。
- (3) 割裂引張り試験では、中性子照射量及び打設深さが異なっても引張り強度への影響認められなかった。
- (4) コンクリートの打設深さが圧縮強度に及ぼす影響として、1m当たり約  $3.5 kgf/cm^2$  の強度増加が確認された。

これらの一連の試験の中から、新たに次のような問題点、課題等が示唆される。

- (1) 高速中性子の照射量が  $10^{19} n/cm^2$  程度以上になると強度低下をきたすとの報告もある。他の原子力施設への適用を考えた場合には、さらに高照射量まで領域を広げた系統的なデータの蓄積が求められる。
- (2) コンクリート構造物の経年変化を評価するためには、コンクリートの置かれていた環境（温度、含水量、中性子及びガンマ線等の放射線照射量）と強度の関係についての定量的な把握が必要となる。放射線照射が圧縮強度に及ぼすメカニズムについて、さらに詳細な検討を必要とする。
- (3) これまで主として圧縮強度を代表的な指標として経年変化をみてきた。しかし、原子力施設のコンクリートには、構造体としての構造機能だけでなく、設備の支持機能、遮蔽機能や封じ込めの機能が期待されることが多い。このため、素材の劣化に着目した試験と共に、これらの機能の共通劣化因子である、ひび割れの進展挙動の把握等に関する試験及び評価が期待される。

## 謝 辞

J P D R の生体遮蔽コンクリートを対象にした本調査の計画及び実施に当たり、動力試験炉部の石川迪夫部長（当時）、原子炉解体1課の横田光雄課長（当時）ほか原子炉解体1課の方々、及び放射線管理3課安中準一氏ほか動力炉管理係の方々に多くの援助、ご協力をいただいた。保健物理部汚染処理1課の服部洋司郎氏には放射化コンクリート供試体の切断及び強度試験に際してご協力いただいた。また、本件は鹿島建設との共同研究として実施したものであり、共同研究を進めるに際し、鹿島建設（株）の原子力設計室及び技術研究所の方々には、建設当時の情報調査をはじめ全面的なご協力をいただいた。改めて、感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) G.E Co. Report "Final design report of JPDR" APED-3998 (1962)
- 2) 大村 道夫、他, "J P D R 原子炉遮蔽コンクリートの応力測定" 原子力学会大会 (1963)
- 3) 宮坂 駿一、他, "放射線輸送・発熱計算コードシステムRADHEAT" JAERI-M 5794 (1974)
- 4) 小山 謙二、他, "A code system for generating coupled neutron and gamma-ray group constants and analyzing radiation transport," JAERI-M7155 (1977)
- 5) 小山 謙二、他, "A one-dimensional discrete ordinates code for neutron and gamma-ray transport calculations," JAERI-M6954 (1977)
- 6) F.R. Minatt et al., "The DOT III two dimensional discrete ordinate transport code," ORNL-TM-4280 (1973)
- 7) 鈴木 計夫, "コンクリートの静弾性係数試験方法" セメント・コンクリートNo 401(1980)
- 8) 日本建築学会, "コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル" (丸善)、(1983)
- 9) H.K. Hilsdorf et al., "The effect of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete" ACI SP55-10
- 10) S. Verrall et al., "Design concepts to minimize the activation of the biological shield of light-water reactors" (1985)

## 謝 詞

JPDRの生体遮蔽コンクリートを対象にした本調査の計画及び実施に当たり、動力試験炉部の石川迪夫部長（当時）、原子炉解体1課の横田光雄課長（当時）ほか原子炉解体1課の方々、及び放射線管理3課安中準一氏ほか動力炉管理係の方々に多くの援助、ご協力をいただいた。保健物理部汚染処理1課の服部洋司郎氏には放射化コンクリート供試体の切断及び強度試験に際してご協力いただいた。また、本件は鹿島建設との共同研究として実施したものであり、共同研究を進めるに際し、鹿島建設（株）の原子力設計室及び技術研究所の方々には、建設当時の情報調査をはじめ全面的なご協力をいただいた。改めて、感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) G.E Co. Report "Final design report of JPDR" APED-3998 (1962)
- 2) 大村 道夫、他, "JPDR原子炉遮蔽コンクリートの応力測定" 原子力学会大会 (1963)
- 3) 宮坂 駿一、他, "放射線輸送・発熱計算コードシステムRADHEAT" JAERI-M 5794 (1974)
- 4) 小山 謙二、他, "A code system for generating coupled neutron and gamma-ray group constants and analyzing radiation transport," JAERI-M7155 (1977)
- 5) 小山 謙二、他, "A one-dimensional discrete ordinates code for neutron and gamma-ray transport calculations," JAERI-M6954 (1977)
- 6) F.R. Minatt et al., "The DOT III two dimensional discrete ordinate transport code," ORNL-TM-4280 (1973)
- 7) 鈴木 計夫, "コンクリートの静弾性係数試験方法" セメント・コンクリートNo 401(1980)
- 8) 日本建築学会, "コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル" (丸善)、(1983)
- 9) H.K. Hilsdorf et al., "The effect of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete" ACI SP55-10
- 10) S. Verrall et al., "Design concepts to minimize the activation of the biological shield of light-water reactors" (1985)

## 謝 辞

JPDRの生体遮蔽コンクリートを対象にした本調査の計画及び実施に当たり、動力試験炉部の石川迪夫部長（当時）、原子炉解体1課の横田光雄課長（当時）ほか原子炉解体1課の方々、及び放射線管理3課安中準一氏ほか動力炉管理係の方々に多くの援助、ご協力をいただいた。保健物理部汚染処理1課の服部洋司郎氏には放射化コンクリート供試体の切断及び強度試験に際してご協力いただいた。また、本件は鹿島建設との共同研究として実施したものであり、共同研究を進めるに際し、鹿島建設（株）の原子力設計室及び技術研究所の方々には、建設当時の情報調査をはじめ全面的なご協力をいただいた。改めて、感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) G.E Co. Report "Final design report of JPDR" APED-3998 (1962)
- 2) 大村 道夫、他, "JPDR原子炉遮蔽コンクリートの応力測定" 原子力学会大会 (1963)
- 3) 宮坂 駿一、他, "放射線輸送・発熱計算コードシステムRADHEAT" JAERI-M 5794 (1974)
- 4) 小山 謙二、他, "A code system for generating coupled neutron and gamma-ray group constants and analyzing radiation transport," JAERI-M7155 (1977)
- 5) 小山 謙二、他, "A one-dimensional discrete ordinates code for neutron and gamma-ray transport calculations," JAERI-M6954 (1977)
- 6) F.R. Minatt et al., "The DOT III two dimensional discrete ordinate transport code," ORNL-TM-4280 (1973)
- 7) 鈴木 計夫, "コンクリートの静弾性係数試験方法" セメント・コンクリートNo 401(1980)
- 8) 日本建築学会, "コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル" (丸善)、(1983)
- 9) H.K. Hilsdorf et al., "The effect of nuclear radiation on the mechanical properties of concrete" ACI SP55-10
- 10) S. Verrall et al., "Design concepts to minimize the activation of the biological shield of light-water reactors" (1985)

- 1 1) 日本建築学会,  
“構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題点”  
pp. 81～92 (1987)
- 1 2) 日本建築学会,
- 1 3) 岡田 清、他,  
“コンクリート工学ハンドブック”（朝倉書店）、p. 393  
(1988)
- 1 4) 日本建築学会,
- 1 5) 岡田 清、他,  
“建築学便覧・II、構造”（丸善）、pp. 731-732 (1977)  
“コンクリート工学ハンドブック”（朝倉書店）、p. 510  
(1988)