点検の着眼点	コンクリート表面状態

読取り単位の( )は肉眼または双眼鏡による単位

点検種類	点検項目および管理項目		読取り単位	点検方法	健全度			備考
					Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	
普通点検	・漏水	有・無						
		位置	10cm					
			(50cm)					
		状況	—					
	・浮き	有・無	—					
		位置	10cm					
		大きさ	1cm					
	・はく離(欠損含む)	有・無	—					
		位置	10cm					
			(50cm)					
		形 大きさ	1cm					
			(10cm)					
		状 厚さ	1cm					
		状況	—					

点検の着眼点	コンクリート表面状態

読取り単位の( )は肉眼または双眼鏡による単位

点検種類	点検項目および管理項目		読取り単位	点検方法	健全度			備考
					Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	
普通点検								
	・骨材露出	有・無	—					
		位置	10cm					
			(50cm)					
		大きさ	1cm					
			(10cm)					
	・鉄筋露出	有・無	—					
		位置・範囲	10cm					
			(50cm)					
		長さ	1cm					
			(10cm)					
		かぶり厚さ	1mm					
		パターン	—					
		腐食状態	—					

点検の着眼点	コンクリート表面状態

読取り単位の( )は肉眼または双眼鏡による単位

点検種類	点検項目および管理項目		読取り単位	点検方法	健全度			備考
					Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	
普通点検								
	・錆汁	有・無	—					
		位置	10cm					
			(50cm)					
		範囲・	—					
		パターン						
	・セパ穴の劣化	有・無	箇所					
		位置	—					

別紙 2

＜柏崎刈羽５号炉周辺地域の凍害危険度について＞

1. はじめに

コンクリート中の水分が凍結し，それが気温の上昇や日射を受けること等により融解する凍結融解を繰り返すことでコンクリートにひび割れが生じ，コンクリート構造物としての健全性が損なわれる可能性がある。

日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事（2018）」（以下，「JASS5」という）に示されている解説図 26.1（凍害危険度の分布図）によると，柏崎刈羽５号炉（以下，「KK5」という）の周辺地域は凍結融解の危険性がない地域に該当している。なお，凍害危険度の分布図にある凍害危険度は，気象資料を用いて外気温上の凍結融解作用の強さに日射等の影響と含水程度を考慮し算出したものである。

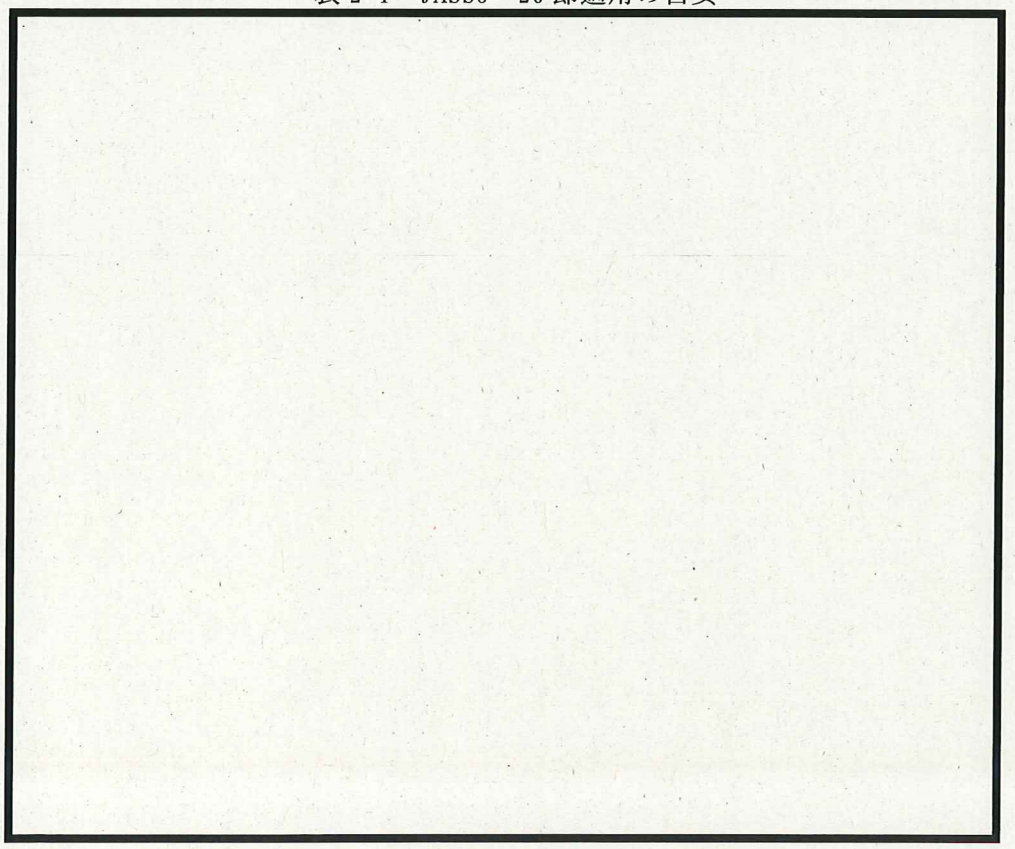
あらためて，気象資料から KK5 周辺地域の凍害危険度を確認した結果を以下に示す。

2. 凍結融解作用を受けるコンクリート

「JASS5　26 節　凍結融解作用を受けるコンクリート」に，寒冷地に建設する建築物の激しい凍結融解作用を受ける部分に使用するコンクリートの仕様が示されている。

そこに，26 節適用の目安の解説表があり，解説表に日最低気温の平滑平年値の年間極値（気象庁資料による）（以下，「最低気温」という）と凍害危険度の関係が示されている。26 節適用の目安の解説表は，表 2-1 参照。

表 2-1　JASS5　26 節適用の目安



3. KK5 周辺地域の凍害危険度

最新の平滑平年値（1981～2010 年の観測値）により，KK5 の周辺地域である，柏崎地域気象観測所の最低気温を確認すると－1.3℃であった。

表 2-1　JASS5　26 節適用の目安において，仙台の最低気温－2.9℃において，凍害危険度は 0 とある。これに対し，KK5 の周辺地域である，柏崎の最低気温は－1.3℃であり，仙台よりも最低気温が高いことから，凍害危険度は 0 となり，凍結融解作用を受ける危険性はない地域と判断した。

また，JASS5 に「わが国の多くの地域で最低気温と凍結融解回数が対応している」とあり，最低気温から凍害危険度を確認することは妥当と考える。

なお，「原子力発電所建築設備点検マニュアル」及び「原子力発電所土木設備点検マニュアル」に基づき，定期的に実施している「建築設備点検業務（平成 30 年度）」並びに「土木設備点検業務（平成 29 年度）」による目視点検の結果，凍結融解に起因するひび割れは確認されていない。

別紙 3

＜鉄骨構造物の疲労評価の計算過程及び判定基準について＞

1. はじめに

風などの繰返し荷重が継続的に鉄骨に作用することにより，疲労による損傷が蓄積され，鉄骨部材あるいは接合部の健全性が損なわれる可能性がある。

柏崎刈羽５号炉の機器・構造物のうち，風による繰返し荷重を受ける排気筒の鉄骨構造物を評価対象とし，排気筒を直接支持している鉄塔の主柱材及び排気筒の筒身について疲労の検討を行う。

評価対象である排気筒の筒身及び鉄塔について，建設時において，筒身は工場溶接で製作したブロックを現地で溶接して組立てており，鉄塔については工場溶接で製作した主柱材を現地でフランジ継手によって接合している。工場製作での品質管理として，鋼材検査証明書（ミルシート）による材料検査，工場出荷時に寸法検査を実施するとともに，放射線透過試験にて異常な欠陥がないことを確認している。排気筒建設以降は，筒身，鉄塔ともに保全計画に基づく外観点検を実施しており，表面に，機能・性能に影響を及ぼすおそれのある割れ・変形等の有意な異常がないことを確認している。

排気筒の疲労評価は，(社) 日本建築学会「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－2005」(以下，「S 規準」という）に示される疲労損傷評価法を参照し，疲労評価を実施している。

S 規準の「7.1 適用範囲」には，「1×10^4 回を超える繰返し応力を受ける部材，及び接合部に対して疲労の検討を行う」と規定されており，日本鋼構造協会編「鋼構造物の疲労設計指針・同解説 1993」等の最新知見を取り入れた上で，建築鋼構造の各種継手形式に対応する疲労設計曲線を定め，応力の繰返し数に応じた許容疲労強さを規定するとともに，変動応力振幅や組合せ応力の繰返しに対する疲労の検討を可能としている。

疲労設計曲線には，応力範囲の打切り限界（疲労限）が設定されており，打切り限界以下の繰返し応力範囲は疲労を考慮する必要はないとされているため，本評価においては，応力の繰返し数及び繰返し応力範囲を算定し，許容疲労強さ並びに打切り限界と比較することにより，疲労を考慮する必要性の有無を評価する。

なお，排気筒においては耐震補強工事を実施していることから，検討条件は耐震補強工事後の工事計画認可申請図書（以下，「工認図書」という）の条件を適用して評価を実施した。

2. 排気筒の疲労評価

2.1 評価条件

(1) 評価対象

風による繰返し荷重を受ける排気筒の鉄骨構造部を対象とした。

(2) 評価内容

① 使用材料

鉄塔（主柱材）：炭素鋼（STK490）*1

筒身：炭素鋼（SMA400A）*2

*1：一般構造用炭素鋼鋼管，*2：溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材

② 検討用風速及び発生日数

風に関する記録として，国立天文台編「理科年表 2018 年版」（以下，「理科年表」という）には，日最大風速（「10 分間の風速の平均値」を表す）10 m/s 以上及び 15 m/s 以上の日数の月別平均値（1981～2010 年までの平均値）が掲載されており，これらのうち，柏崎刈羽５号炉近傍の気象官署地点として，新潟，高田を選定する。

各気象官署における風に関する記録を表 3-1 に示す。

表 3-1　発電所近傍の気象官署における風に関する記録

項　目	新潟	高田
日最大風速 10 m/s 以上の日数の年間平均値（日）	48.5	11.4
日最大風速 15 m/s 以上の日数の年間平均値（日）	3.2	0.5

これらを踏まえ，新潟気象官署の記録を用いて，以下の 2 ケースで検討を行う。

- ケース 1：検討用風速 V_1 ＝ 10.0 m/s，年間平均日数 48.5（日）
- ケース 2：検討用風速 V_2 ＝ 15.0 m/s，年間平均日数 3.2（日）

(3) 応力の繰返し数

理科年表より求められた年間平均日数を評価年数 40 年分の累積時間（秒）に換算し，各ケースに対する累積時間を以下のように算定する。なお，補強工事は平成 22 年に実施されているが，建設時からの累積とした。

- ケース 1：発生日数（48.5 日）×1 日中（24 時間×3,600 秒）×評価年数（40 年間）
- ケース 2：発生日数（3.2 日）×1 日中（24 時間×3,600 秒）×評価年数（40 年間）

この累積時間を，工認図書における排気筒の一次固有周期で除した値を，応力の繰返し数として求める。応力の繰返し数の算定結果を表 3-2 に示す。

表 3-2　各ケースの応力の繰返し数

ケース	検討用風速 (m/s)	累積時間の算定				排気筒の 1 次固有周期 (秒)	応力の 繰返し数 (回)
		発生 日数	評価 年数	累積 日数	累積秒数		
1	10.0	48.5	40 年	1,940	167,616,000	1.203	1.39×10^{8}
2	15.0	3.2		128	11,059,200		9.19×10^{6}

(4) 基準疲労強さ及び応力の打切り限界（変動振幅）

鉄塔（主柱材）及び筒身の母材は，S 規準の表 7.1 における「圧延材，引抜き材」に該当するが，主柱材接合部は高力ボルトとしていること，及び筒身は縦横方向に完全溶込み溶接されていることを考慮し，基準疲労強さ $\Delta\sigma_F$ 及び変動振幅の応力範囲の打切り限界 $\Delta\sigma_{VL}$ を以下に示す通りとする。

・基準疲労強さ　　：$\Delta\sigma_F = 100\ N/mm^2$
・応力範囲の打切り限界：$\Delta\sigma_{VL} = 39\ N/mm^2$

(5) 許容疲労強さ

許容疲労強さは，荷重の繰返し数（N）に応じて応力範囲で示され，S 規準の 7.1 式により以下のように示される。

・ 垂直応力範囲の許容疲労強さ：$\Delta\sigma_a = (126 / \sqrt[3]{N}) \times \Delta\sigma_F$

N：総繰返し数

$\Delta\sigma_F$：垂直応力範囲の基準疲労強さ

(6) 検討用応力

工認図書の風荷重に対する応力解析結果は，基準風速 V_0=30.0 (m/s)*を用いて算定された数値であるため，風荷重が風速の 2 乗に比例することから，本検討においては (2) の検討用風速 V_1, V_2 と基準風速 V_0 との比 α（観測記録の最大風速の 2 乗／基準風速の 2 乗）を算定し，係数倍した応力を風荷重に対する検討用応力とする。

・ ケース 1：$\alpha_1 = V_1^2 / V_0^2 = 10.0^2 / 30.0^2 = 0.1111\cdots \fallingdotseq 0.12$
・ ケース 2：$\alpha_2 = V_2^2 / V_0^2 = 15.0^2 / 30.0^2 = 0.25$

*：基準風速 V_0 は，各地域における風の性状に応じて 30～46 (m/s) の範囲で国土交通大臣が定める風速を示す。

2.2 評価内容

(1) 検討用応力の算定

検討用応力は，工認図書に記載される設計用風荷重による曲げモーメント M_1 を用いて算定する。検討用応力の算定結果について表 3-3 に示す。

・ 検討用風荷重による曲げモーメント：$M_2 = \alpha M_1$

表 3-3 (1/2)　検討用応力の算定例（筒身）

ケース	標高 T.M.S.L (m)	寸法 (mm)	風荷重		
			設計用応力	検討用応力	
			曲げモーメント M_1 (kN·m)	係数 α	曲げモーメント M_2 (kN·m)
1	47.0～12.5	3,426φ ×13	1,804.1	0.12	216.5
2				0.25	451.0

表 3-3 (2/2)　検討用応力の算定例（鉄塔（主柱材））

ケース	標高 T.M.S.L (m)	寸法 (mm)	風荷重		
			設計用応力	検討用応力	
			曲げモーメント M_1 (kN·m)	係数 α	曲げモーメント M_2 (kN·m)
1	73.0～47.0	812.8φ ×12	151.7	0.12	18.2
2				0.25	37.9

(2) 検討用応力範囲の算定

検討用応力範囲Δσは，工認図書に記載される断面算定結果を用いて，最大風速が正負交番荷重（完全両振り）として作用した場合を想定し，以下のように算定する。検討用応力範囲の算定結果について表 3-4 に示す。

・ 検討用応力範囲：$\Delta\sigma = (M_2/Z) \times 2$

表 3-4（1/2） 検討用応力範囲の算定結果（筒身）

ケース	標高 T.M.S.L (m)	寸法 (mm)	断面係数 Z ($\times 10^3$ mm^3)	検討用応力曲げモーメント M_2 (kN・m)	曲げ応力度 M_2/Z (N/mm^2)	検討用応力範囲Δσ (N/mm^2)
1	47.0～12.5	3,426φ ×13	100,000	216.5	2.2	4.4
2				451.0	4.6	9.2

表 3-4（2/2） 検討用応力範囲の算定結果（鉄塔（主柱材））

ケース	標高 T.M.S.L (m)	寸法 (mm)	断面係数 Z ($\times 10^3$ mm^3)	検討用応力曲げモーメント M_2 (kN・m)	曲げ応力度 M_2/Z (N/mm^2)	検討用応力範囲Δσ (N/mm^2)
1	73.0～47.0	812.8φ ×12	5,960	18.2	3.1	6.2
2				38.0	6.4	12.8

2.3 評価結果

算定した検討用応力範囲Δσと許容疲労強さ$\Delta\sigma_a$の比較を行い，許容疲労強さ及び打切り限界（疲労限）以下であることを確認する。2.2 で算定した検討用応力範囲Δσと許容疲労強さ$\Delta\sigma_a$の比較結果を表 3-5 に示す。

また，S 規準の図 7.1.1 を参考に，検討結果をプロットしたものを図 3-1 に示す。

したがって，いずれの部材も許容疲労強さ及び打切り限界（疲労限）以下となっている。

表 3-5（1/2）　検討用応力範囲の算定結果（筒身）

ケース	基準疲労強さ $\Delta\sigma_F$ (N/mm²)	総繰返し数 (回)	許容疲労強さ $\Delta\sigma_a$ (N/mm²)	検討用応力範囲 $\Delta\sigma$ (N/mm²)	$\Delta\sigma$と$\Delta\sigma_a$との比較
1	100	1.39×10^8	39.0*	4.4	0.12
2	100	9.19×10^6	60.1	9.2	0.16

*：打切り限界値を示す（図 3-1 参照）

表 3-5（2/2）　検討用応力範囲の算定結果（鉄塔（主柱材））

ケース	基準疲労強さ $\Delta\sigma_F$ (N/mm²)	総繰返し数 (回)	許容疲労強さ $\Delta\sigma_a$ (N/mm²)	検討用応力範囲 $\Delta\sigma$ (N/mm²)	$\Delta\sigma$と$\Delta\sigma_a$との比較
1	100	1.39×10^8	39.0*	6.2	0.16
2	100	9.19×10^6	60.1	12.8	0.22

*：打切り限界値を示す（図 3-1 参照）

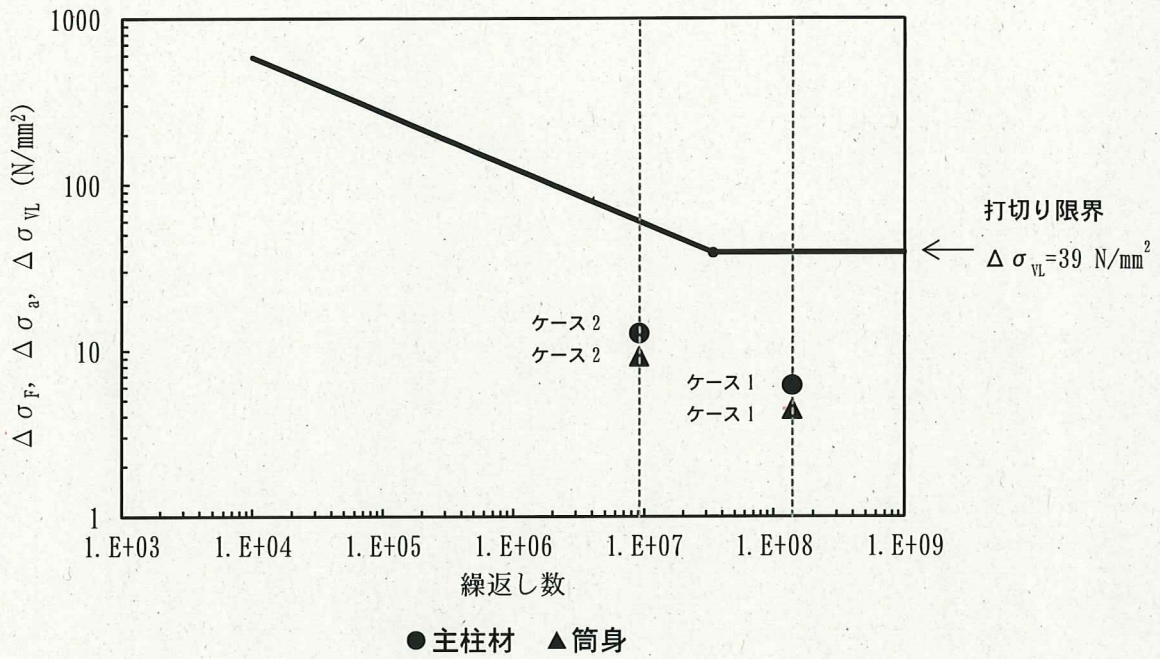


図 3-1　垂直応力範囲の繰返しによる疲労設計曲線

別紙4

＜原子炉ペデスタルの温度分布解析について＞

柏崎刈羽５号炉（以下，「KK5」という）の原子炉ペデスタルコンクリートと圧力容器支持脚部との接触面におけるコンクリートの温度分布解析について以下に示す。

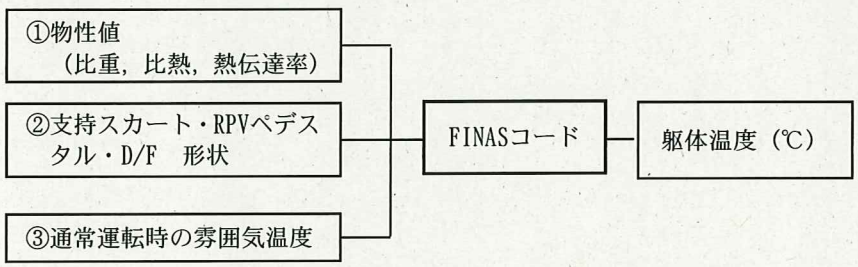
1. 温度分布解析の方法

評価モデルは，原子炉圧力容器下部（以下，「支持スカート」という）から原子炉本体基礎（以下，「RPVペデスタル」という），ダイヤフラムフロア（以下，「D/F」という）とした。

なお，RPVペデスタルは鋼板とコンクリートから形成されているが，円筒部は鋼構造であり，内部充填コンクリートは強度部材ではないことから，コンクリート温度の評価対象は，鉄筋コンクリート部材であるRPVペデスタルの中間スラブ上面とD/Fの床スラブ上面とする。

解析は，熱伝導計算コードFINAS（Version 19.0）を使用し，通常運転時の雰囲気温度を入力値として評価対象部位の躯体温度を求めた。

FINASコードは，高速増殖炉の開発において遭遇した様々な構造設計，ならびに構造強度評価上の課題を解決する手段として，動力炉・核燃料開発事業団（現：独立行政法人日本原子力研究開発機構）により開発されたコードであり，入力パラメーターは以下の通りである。



2. 解析条件

2.1 解析モデル

解析モデルは，KK5の工事計画認可申請図書（以下，「工認図書」という）と同範囲とし，支持スカート・RPVペデスタル・D/Fからなる2次元軸対象モデルとする。解析モデルを図4-1に示す。

2.2 解析条件

(1) 材料定数

KK5 工認図書においては，支持スカートについて温度分布解析に必要な物性値が示されていないことから，使用材料を確認した上で，表 4-1 に示す通り，先行機である[redacted]の物性値を採用した。また，RPV ペデスタル及び D/F の使用材料と物性値を表 4-2 に示す。

(2) 境界条件

温度分布解析における境界条件は，KK5 工認図書に基づき，図 4-2 及び表 4-3 に示す通りとした。

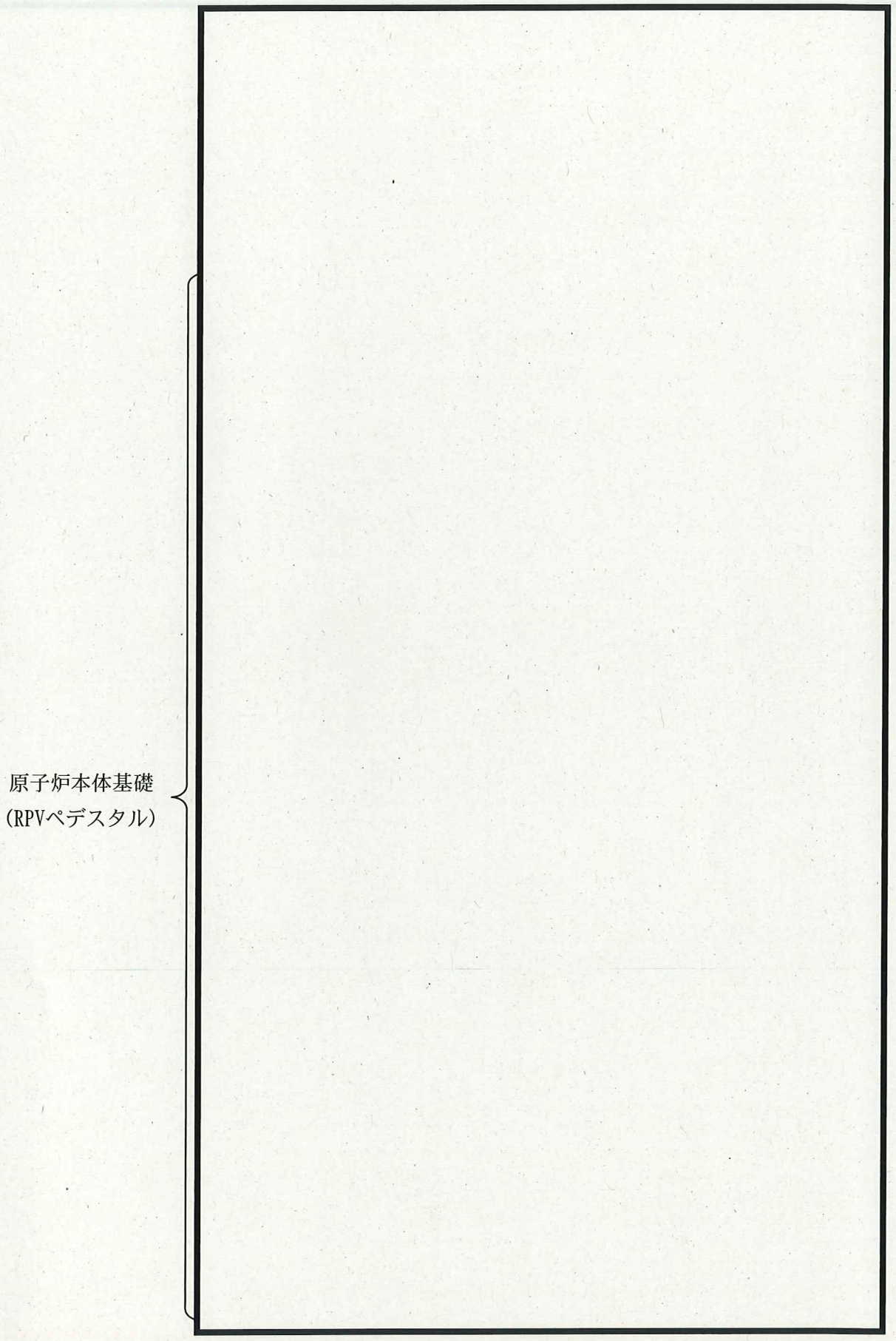


図 4-1　温度分布解析モデル

表4-1　材料の物性値（支持スカート）

材　料	材種	比重 ρ [kg/m^3]	比熱Cp [kcal/kg℃]	熱伝導率λ [kcal/mh℃]
①ライナ				
②円筒胴				
③下鏡				
④支持スカート				

表4-2　材料の物性値（RPVペデスタル・D/F部）

材　料	材種	比重 ρ [kg/m^3]	比熱Cp [kcal/kg℃]	熱伝導率λ [kcal/mh℃]
鋼板				
コンクリート				

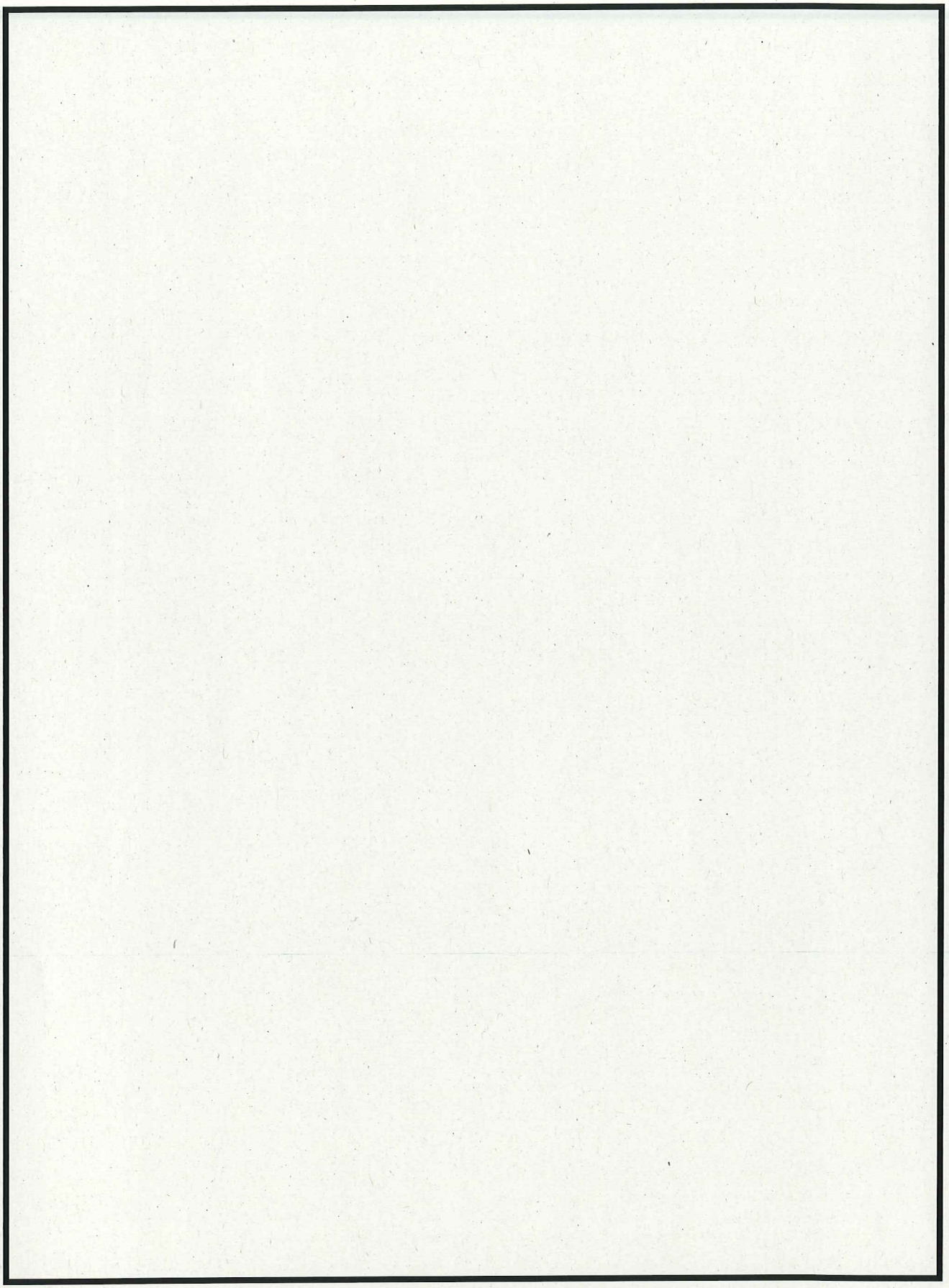


図4-2 (1)　境界条件1/2（境界1～8：支持スカート）

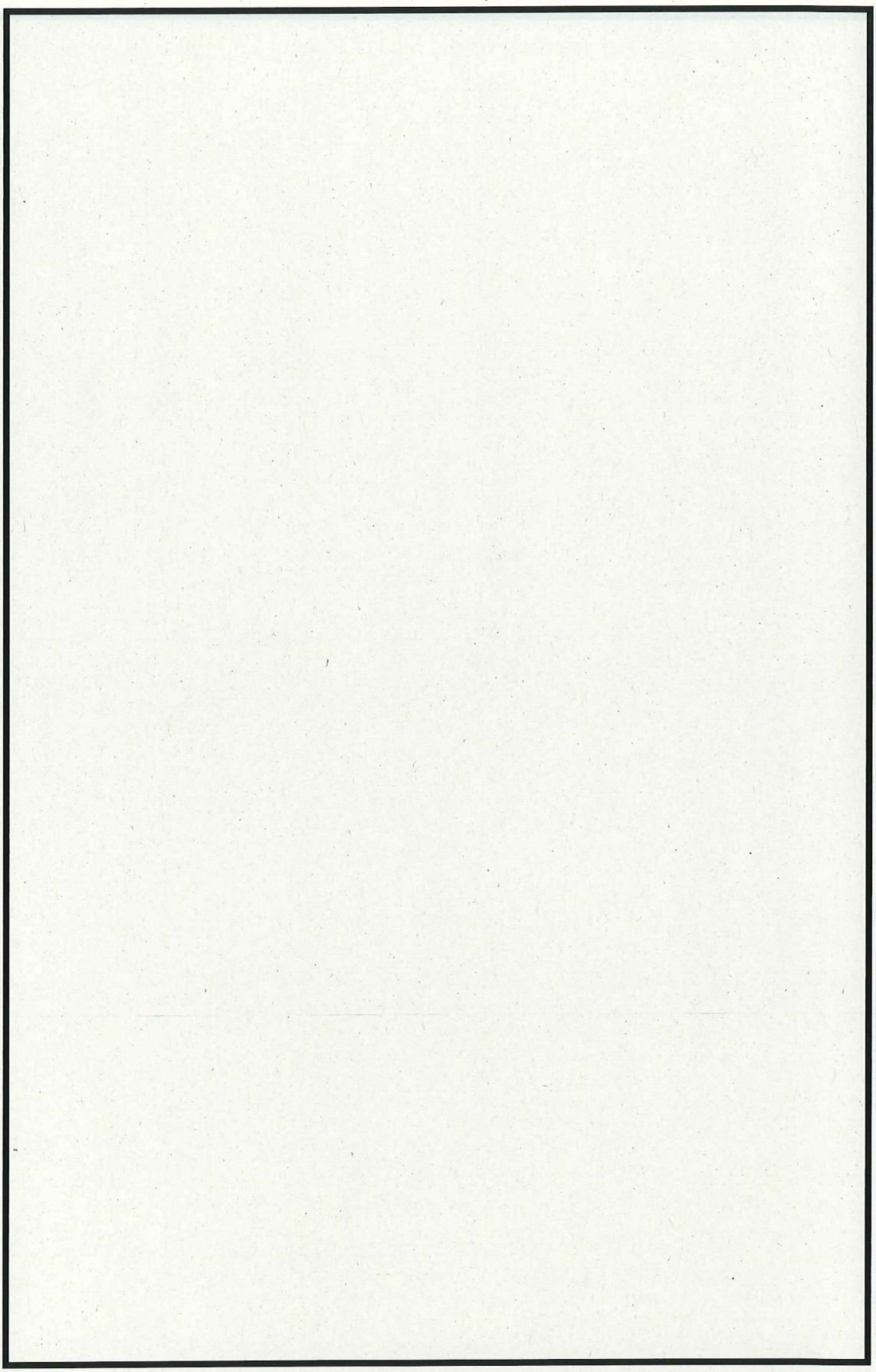
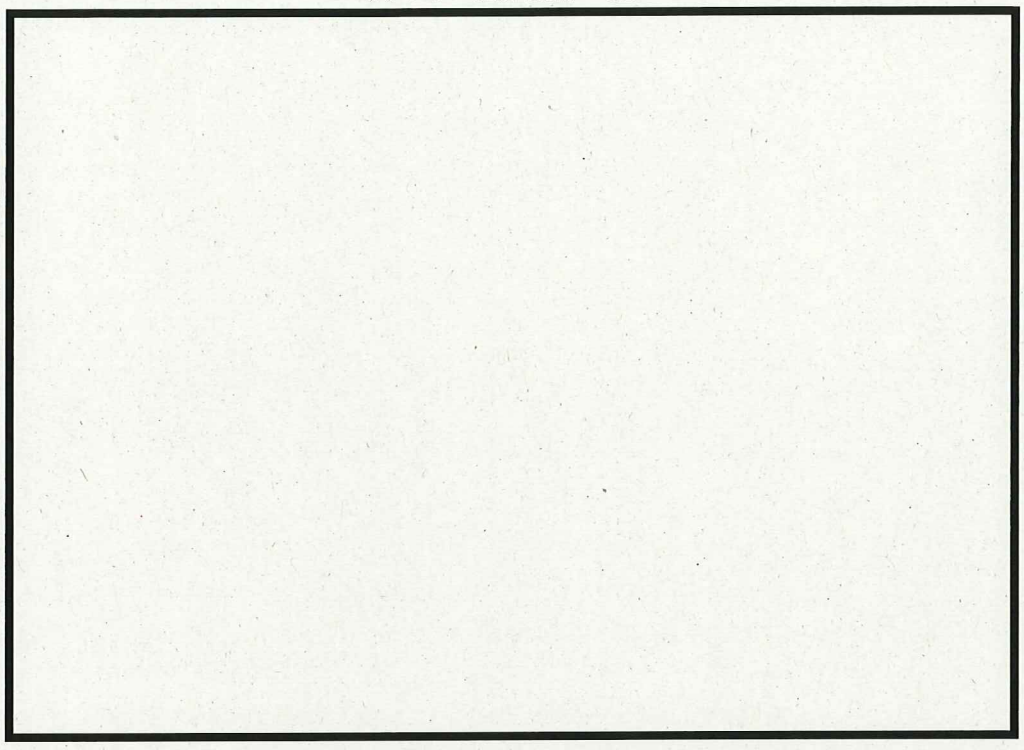


図4-2 (2)　境界条件2/2（境界8～11：RPVペデスタル～D/F部）

表 4-3　境界条件一覧



3. 解析結果

解析結果のうち，評価対象であるコンクリート躯体（RPV ペデスタル中間スラブ及び D/F スラブ）における最高温度を整理して表 4-4 に示す。また，解析結果の詳細として各部のコンター図を図 4-3 及び図 4-4 に示す。

温度分布解析の結果，原子炉ペデスタルコンクリートと圧力容器支持脚部との接触面におけるコンクリート躯体の最高温度は，RPV ペデスタル中間スラブ上面で 52.6℃であり，（社）日本建築学会「原子炉建屋構造設計指針・同解説（1988）」において設計基準強度確保の観点から定められているコンクリートの温度制限値（一般部 65 ℃，局部 90 ℃）を下回った。

表4-4　コンクリート躯体における最高温度

RPVペデスタル 中間スラブ上面 最高温度（℃）	D/F スラブ上面 最高温度（℃）	備　考
52.6	50.6	

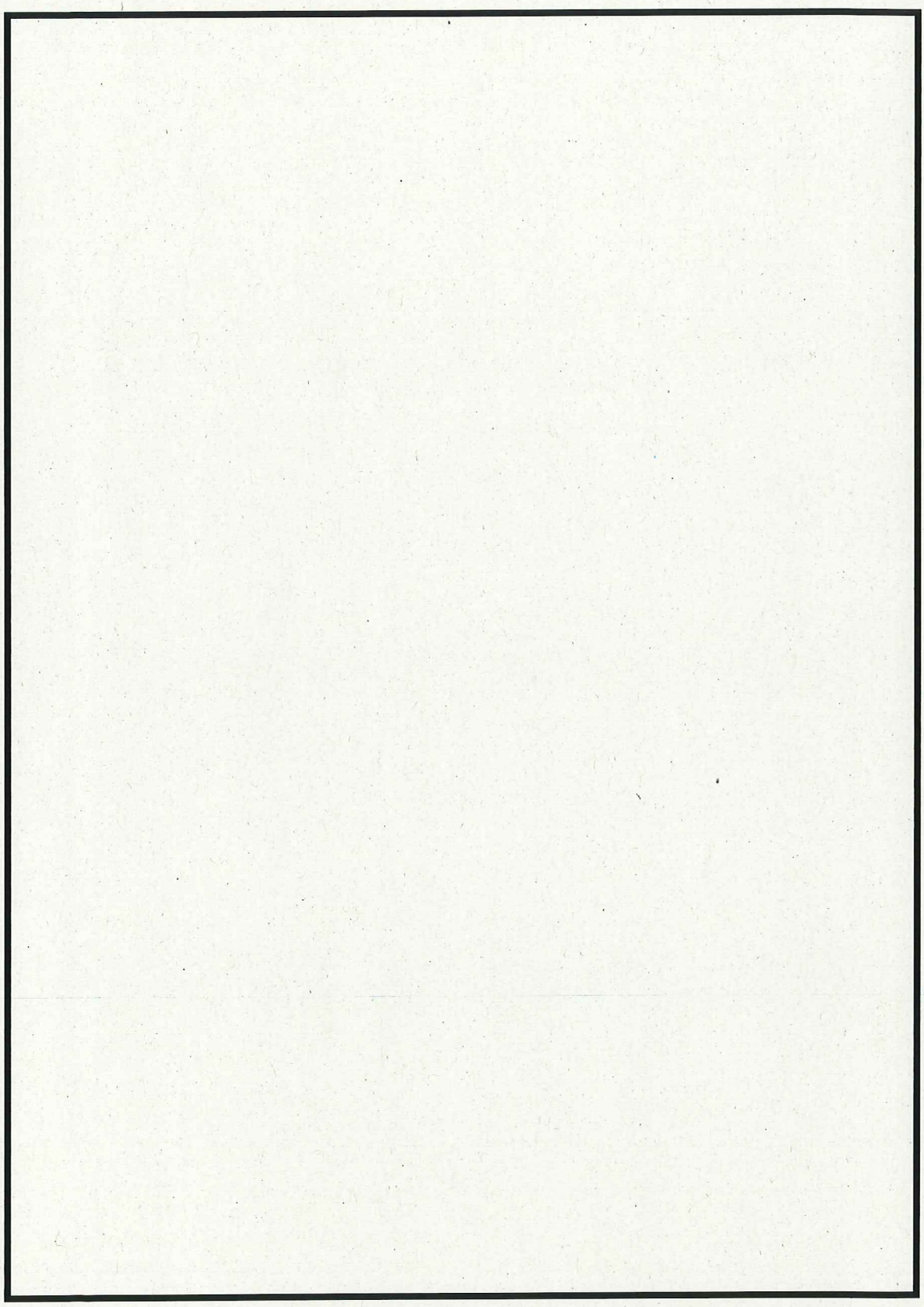


図 4-4　温度分布解析結果コンター図（下部）

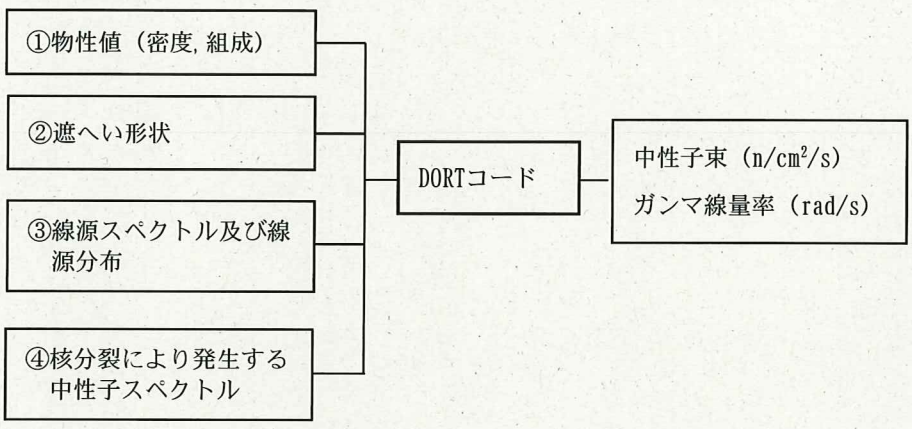
別紙5

＜放射線照射量の算定方法，条件及び結果について＞

1. 算定方法

原子炉ペデスタルコンクリート上部の放射線照射量は，原子炉圧力容器周囲を評価モデルとして，輸送計算コードDORT（DOORS3.2aバージョン　2次元Sn法）により，各部における中性子束（E＞0.1MeV）及びガンマ線量率を算定し，運転時間を掛けることで中性子，ガンマ線照射量を求めている。

DORTコードは，米国のオークリッジ国立研究所で開発された中性子輸送方程式を数値的に解くコードであり，入力パラメーターは以下のとおりである。



2. 算定条件

(1) 評価モデル

評価モデルは，2次元 R-Z体系モデルとする。評価モデル及び領域（材質）マップを図5-1に示す。

(2) 線源設定

線源は，柏崎刈羽５号炉の定格運転時の炉心出力分布形状から設定する。

なお，図 5-2 に示すように線源領域を，軸（鉛直）方向は等間隔 24 節点（ノード），径方向は中心部 1 領域，その周囲に燃料集合体 1 層ずつ 6 領域の合計 7 領域に分割し，線源形状は軸方向（図 5-3），径方向（図 5-4）に分布を持つものとする。図 5-3 は，図 5-2 に示した径方向燃料集合体領域（領域 1～7）ごとの軸方向の相対線源分布を，図 5-4 は，各径方向燃料集合体領域の相対線源の軸方向平均値を表す。

なお，領域 1 は制御棒により出力が抑えられているため，領域 2 で相対線源が最大となっている。図 5-3 で「最大」は相対線源が最大となる領域 2 のピーク値，「炉心境界」は線源領域の最外周である領域 7 のピーク値を表す。図 5-4 で「最大」は領域 2 の軸方向平均値，「炉心境界」は領域 7 の軸方向平均値を表す。

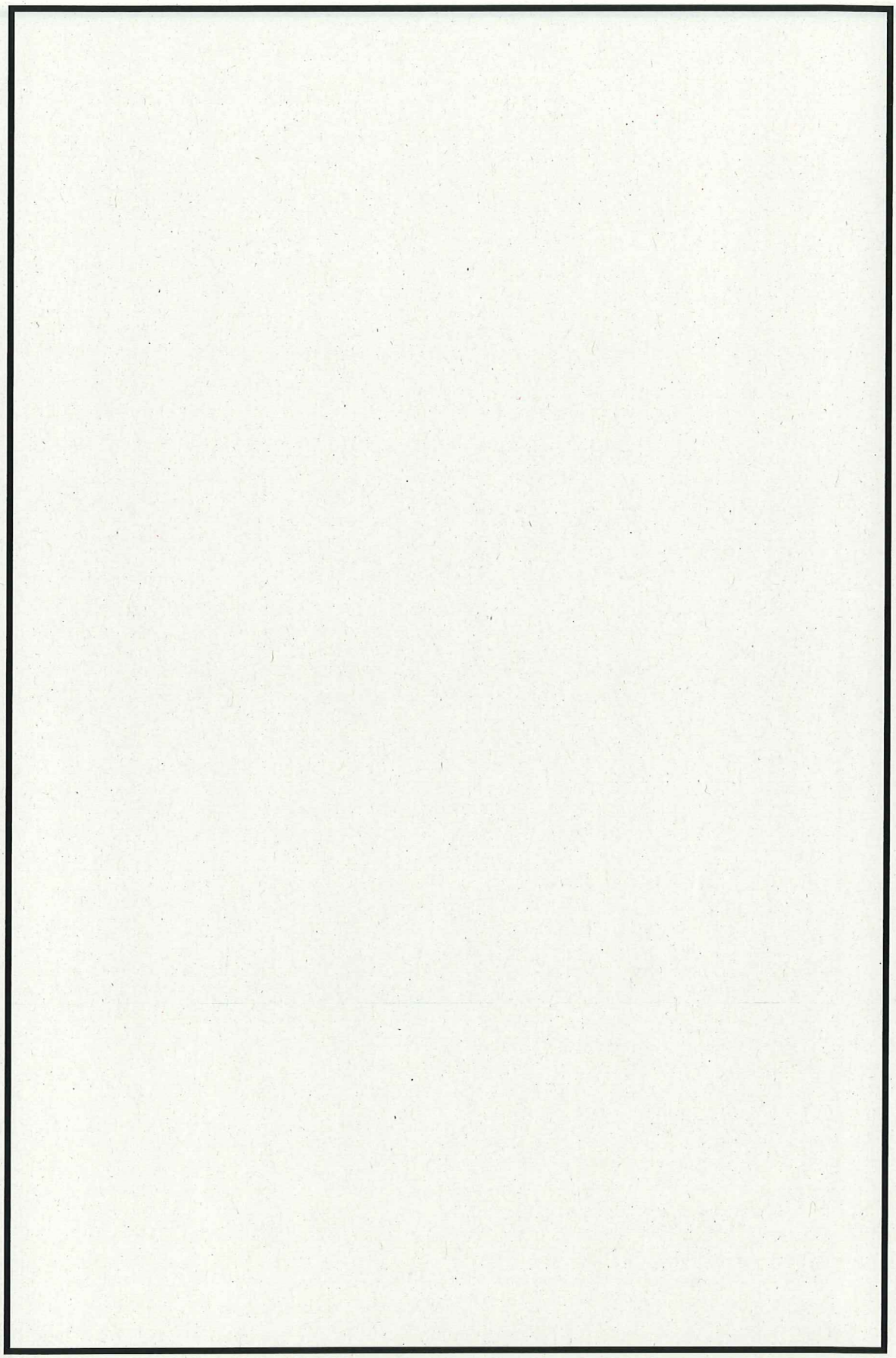


図 5-1　評価モデル及び領域（材質）マップ

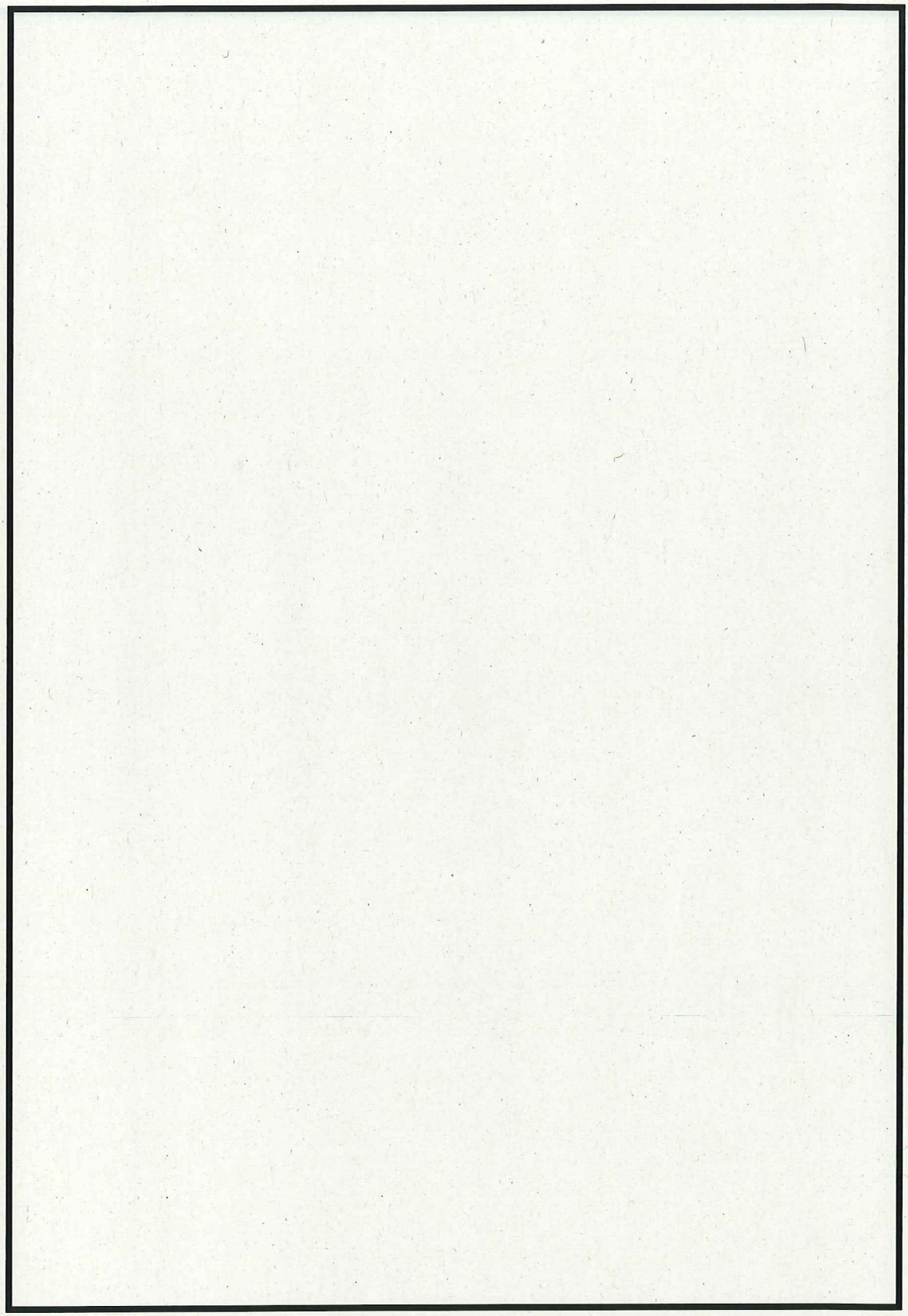


図 5-2　線源領域分割イメージ

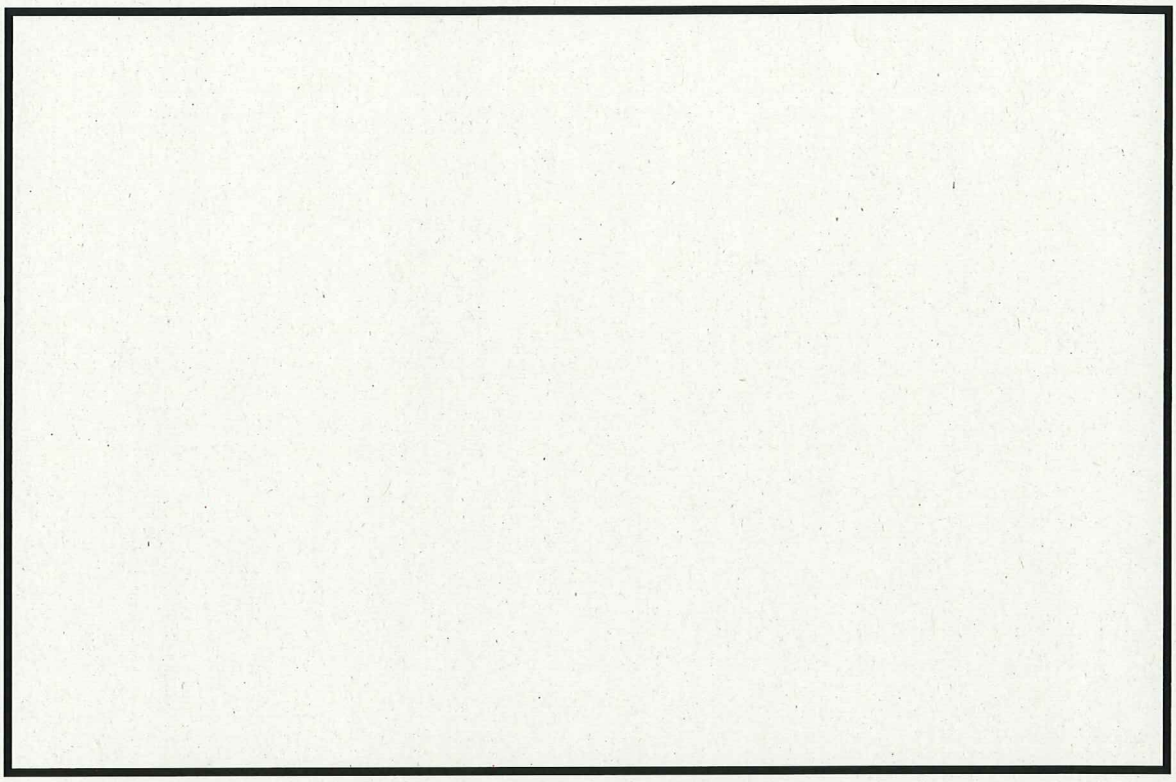


図 5-3　軸方向の相対線源分布

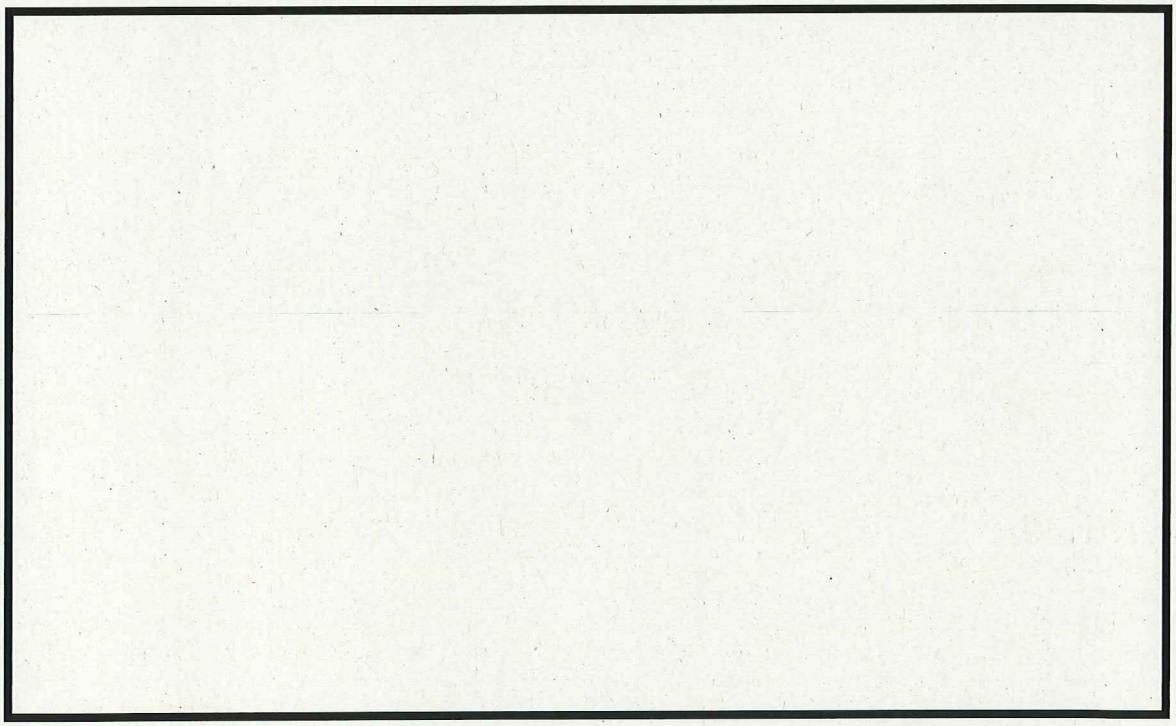


図 5-4　径方向の線源分布（相対線源の軸方向平均値）

3. 算定結果

原子炉格納容器内における定格運転時の中性子束分布を図5-5に，ガンマ線量率分布を図5-6に示す。コンクリート躯体部分（原子炉ペデスタル又は一次遮へい壁内面）において，中性子束，ガンマ線量率が最大となる部位は，一次遮へい壁内面であった。

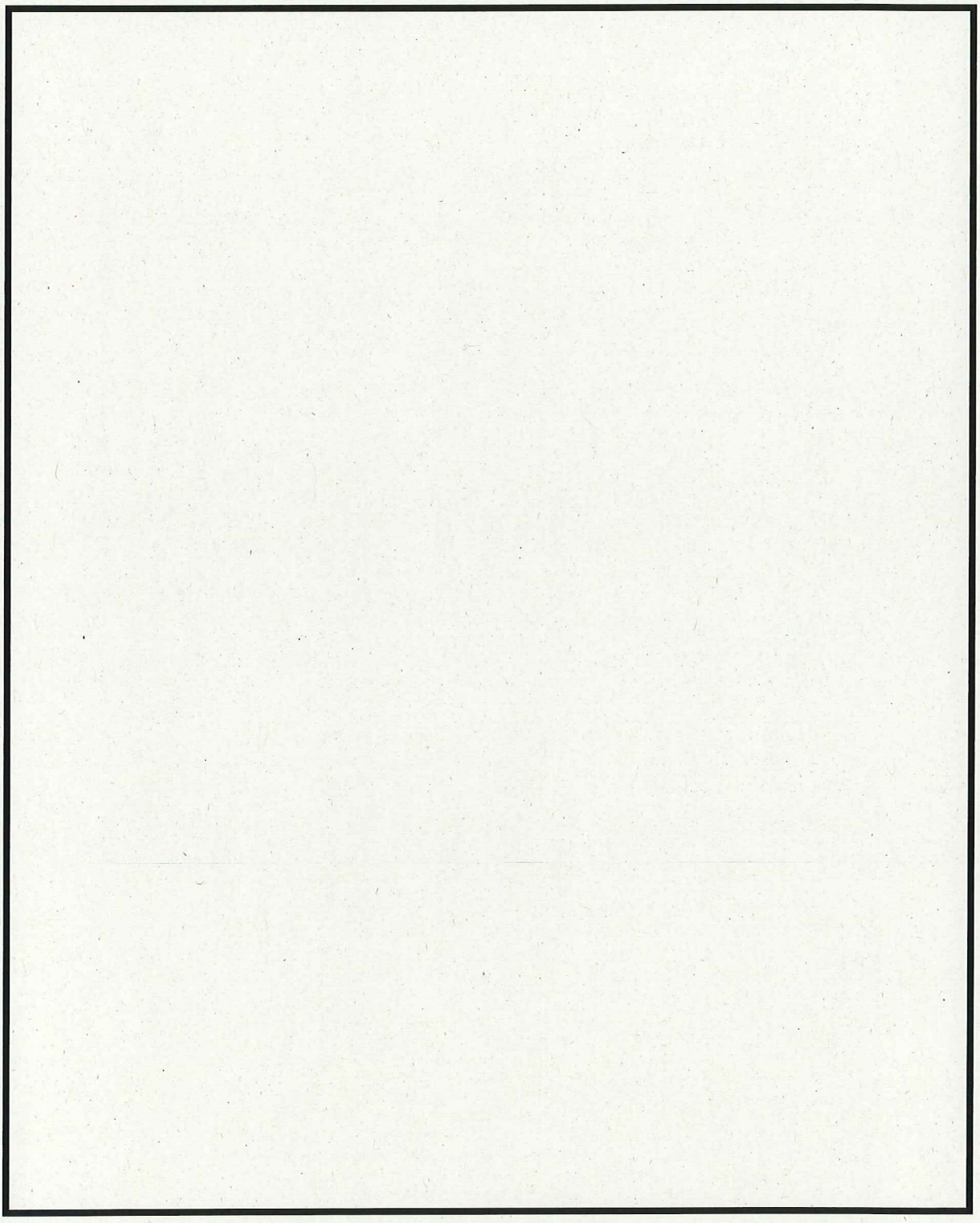


図 5-5　中性子束分布図 (n/cm²/s)

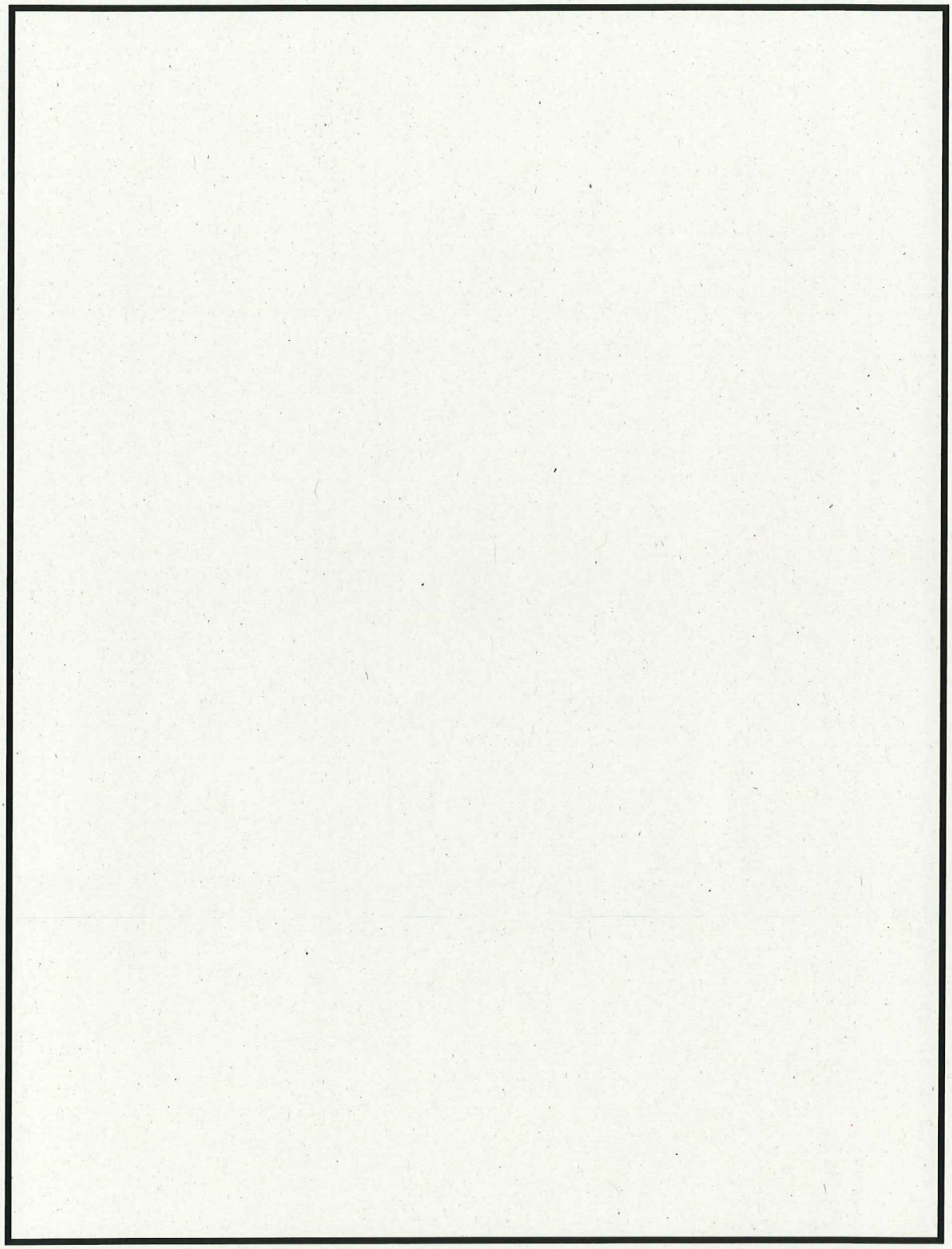


図5-6　ガンマ線量率分布図(rad/s)

4. 運転開始後40年時点の実効運転期間

2017年3月時点及び運転開始後40年時点の定格負荷相当年数（EFPY）は，累積発電電力量から下記の通り算定した。

＜2017年3月時点のEFPY＞

＝2017年3月時点の累積発電電力量÷定格出力÷24÷365

＝143,154,250（MWh）／1,100（MW）／24（h）／365（D）

＝14.86 EFPY

＜運転開始後40年時点のEFPY＞

＝14.86 EFPY*1

*1：2017年3月時点から運転開始後40年時点までは冷温停止状態を継続するため，EFPYは2017年3月時点と同じ値とする。

5. 40年時点における評価

解析結果により得られた一次遮へい壁内面における中性子束及びガンマ線量率に対し，運転開始後40年時点における定格負荷相当年数（EFPY＝14.86年）を乗じ，一次遮へい壁が受ける照射量を算定した結果を表5-1に示す。

その結果，運転開始後40年時点で予想される中性子照射量は一次遮へい壁内面において9.16×10^{14} n/cm^2，ガンマ線照射量は一次遮へい壁内面において1.05×10^{6} radであり，Hilsdorf等の文献におけるコンクリートの強度低下に係るしきい値（中性子照射量1×10^{20} n/cm^2，ガンマ線照射量2.0×10^{10} rad）をいずれも下回った。

表5-1　照射量算定結果

	解析結果	運転開始後40年時点の累積放射線照射量
中性子照射量	1.95×10^{6} n/cm^2/s	9.16×10^{14} n/cm^2
ガンマ線照射量	2.24×10^{-3} rad/s	1.05×10^{6} rad

別紙6

＜中性化の評価点を選定した過程について＞

中性化の評価対象部位は，屋外と屋内では鉄筋位置に対する中性化深さと鉄筋腐食開始の関係が異なることから，各々に対して評価対象部位を抽出した。

屋内における中性化の評価対象部位の決定に際して実施した環境測定及び中性化の評価点の選定過程について以下に示す。

1. 環境測定

中性化の進展度合いは，環境要素（温度，相対湿度，二酸化炭素濃度）の影響を受けることから，環境測定を実施した。

(1) 測定方法

環境測定に使用した機器を表6-1に示す。温度，相対湿度の測定は，平成28年8月1日から平成29年7月31日の期間で実施し，1時間間隔で連続測定を行った。二酸化炭素濃度の測定は，平成28年8月から平成29年7月の期間で各月毎に1回測定を行った。

表6-1 環境測定 使用機器

測定場所	測定項目	使用機器
構内各所	温度	温湿度計
	相対湿度	
	二酸化炭素濃度	二酸化炭素濃度計

(2) 測定位置

測定箇所の選定にあたっては下記a，bを基本に，その他c～fを加味し，計43箇所にて測定を実施した。

a. 仕上げに無塗装部がある箇所
b. 空気系統区分毎に１箇所以上
c. 各建屋の代表エリア（各系統・各階の主要部）
d. 既往のPLMで代表部位とされたエリア
e. 室内設計温度が異なる箇所
f. 人・車の往来の多い箇所

測定位置図を図6-1～22に示す。

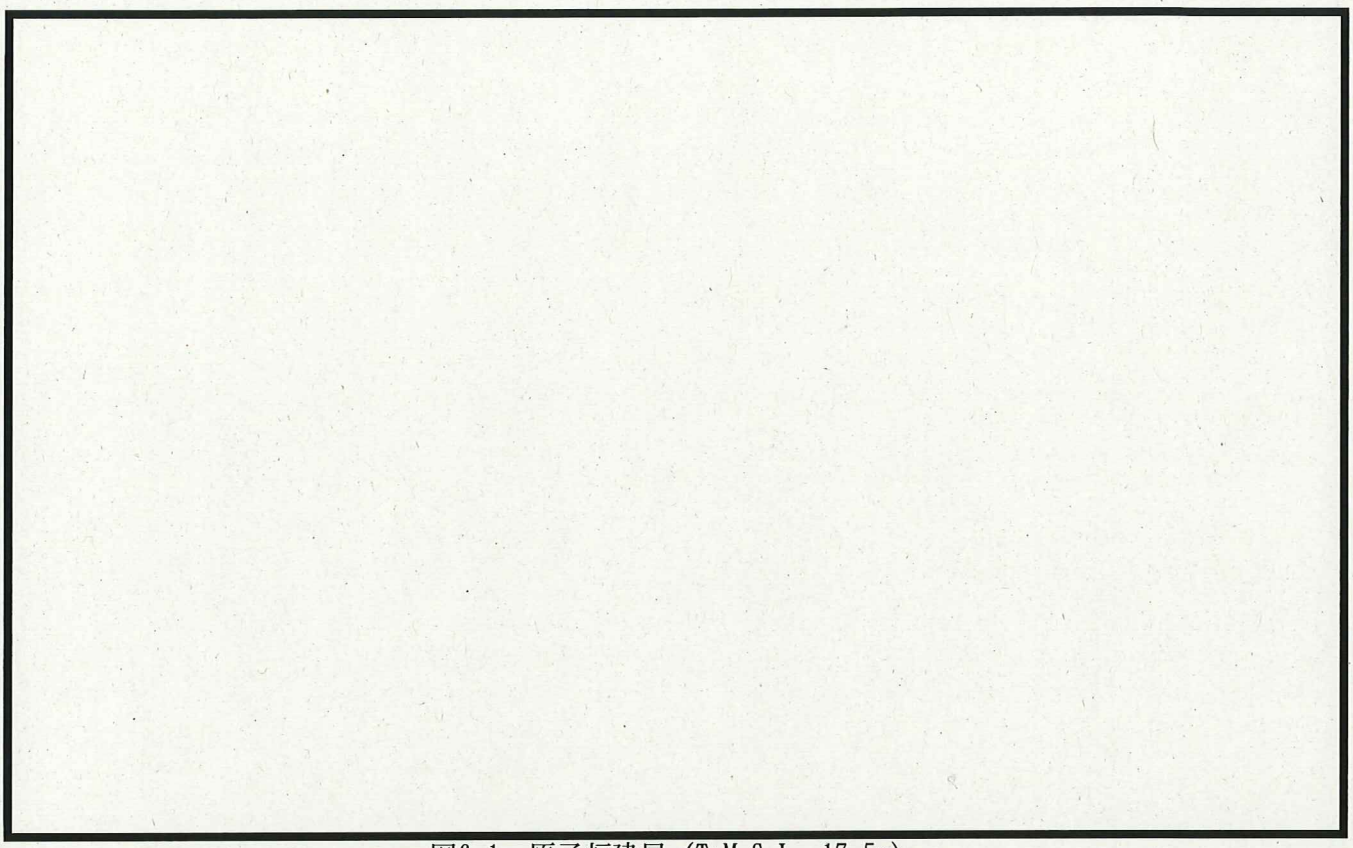


図6-1　原子炉建屋（T.M.S.L.-17.5m）

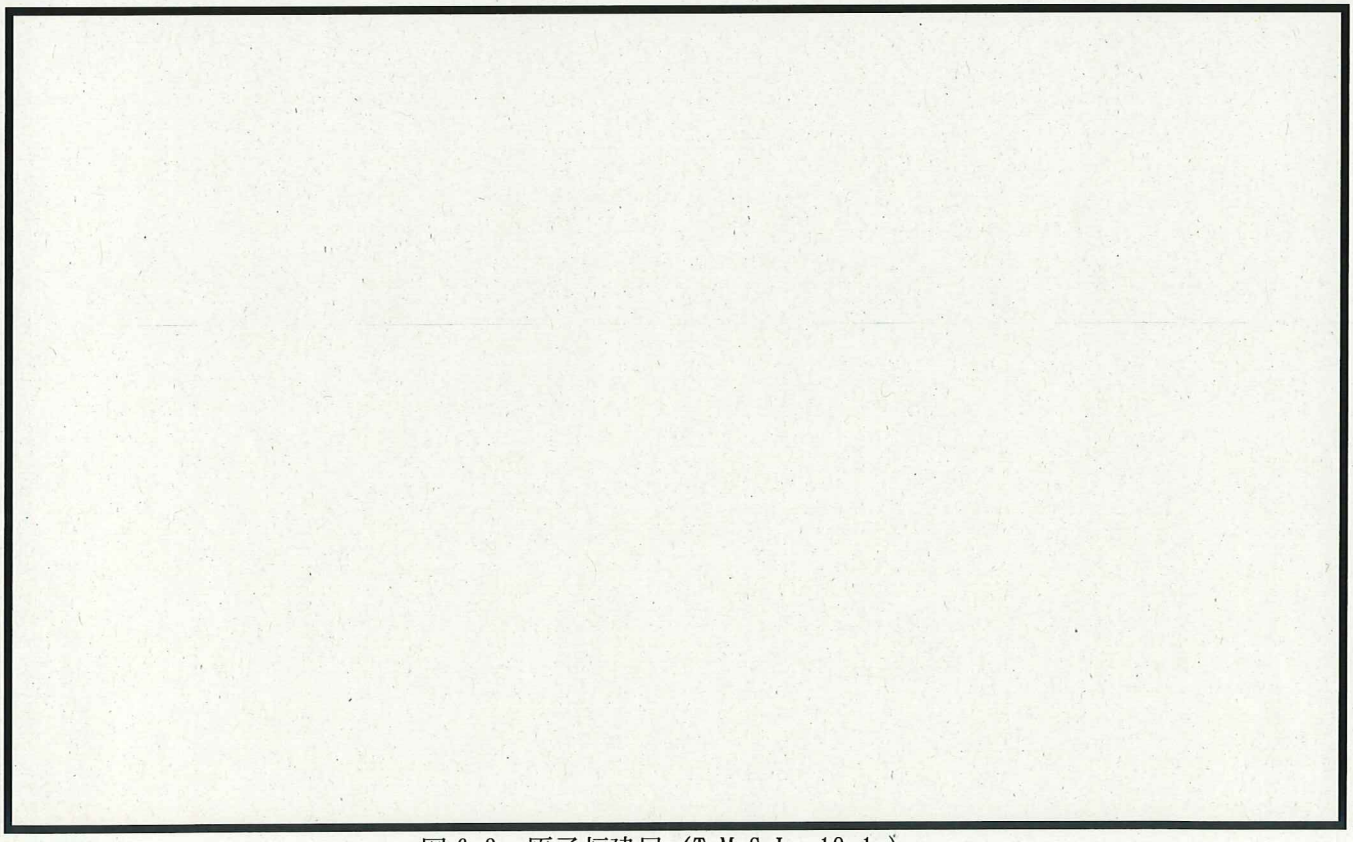


図 6-2　原子炉建屋（T.M.S.L.-10.1m）

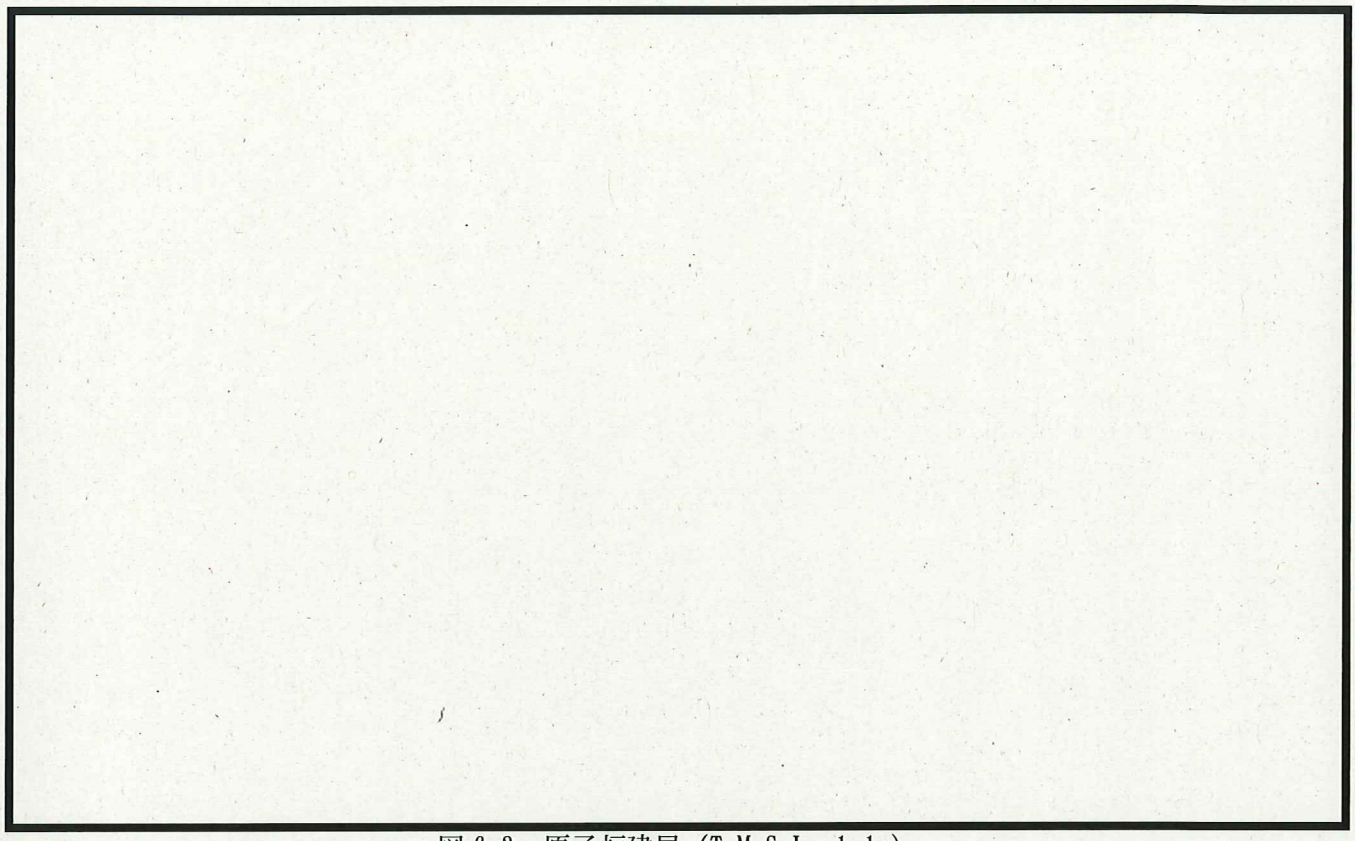


図 6-3　原子炉建屋（T.M.S.L.-1.1m）

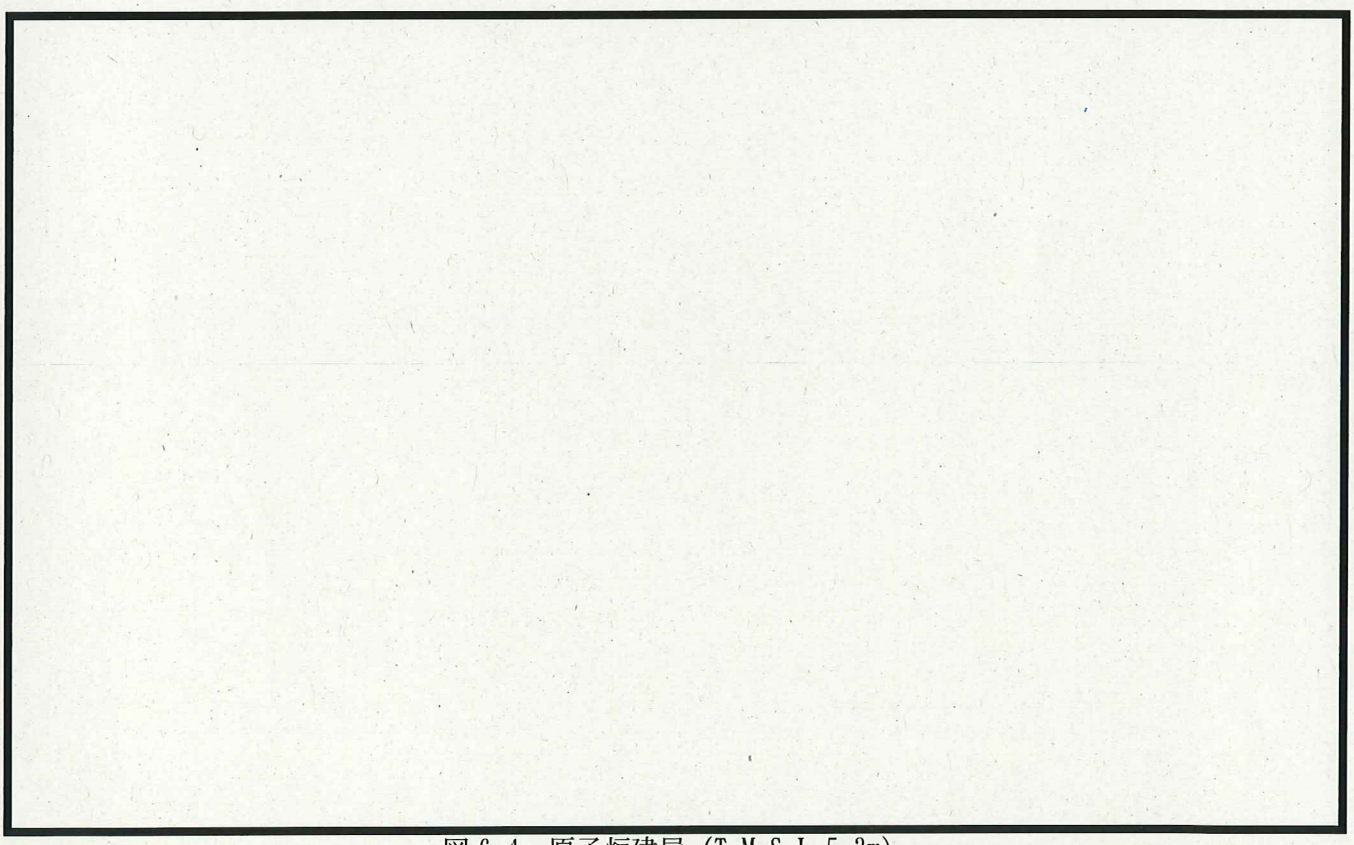


図 6-4　原子炉建屋（T.M.S.L.5.3m）

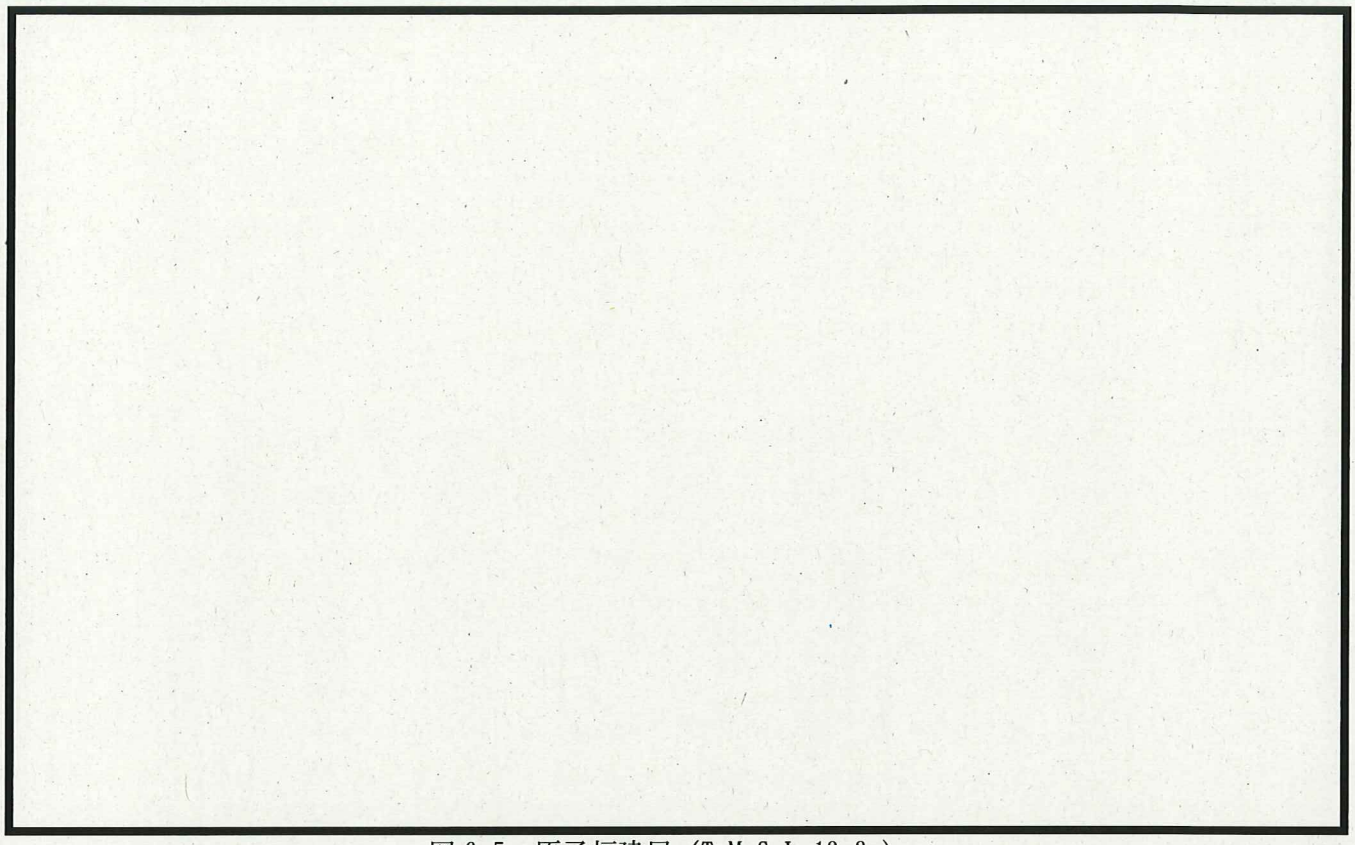


図 6-5　原子炉建屋（T.M.S.L. 12.3m）

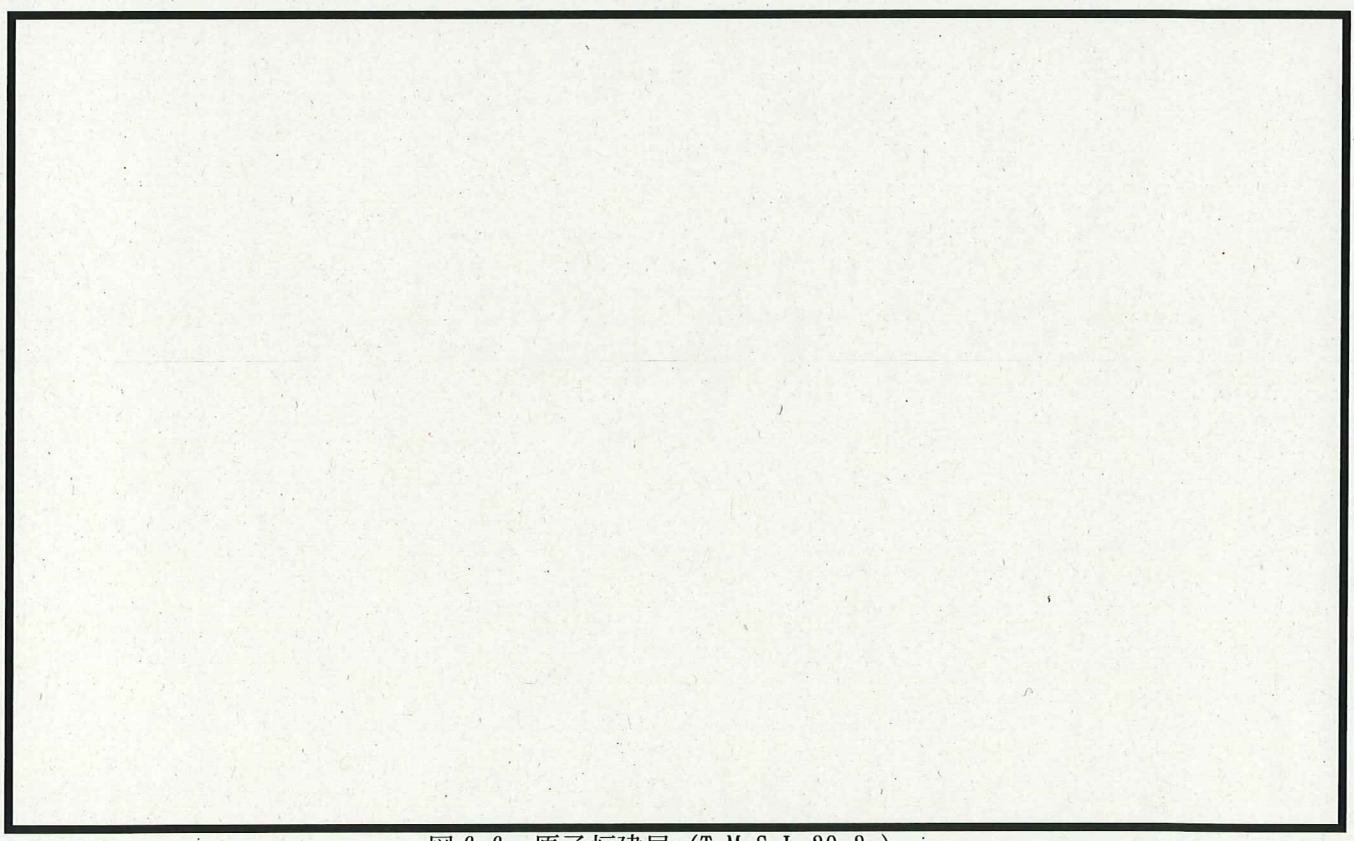


図 6-6　原子炉建屋（T.M.S.L. 20.3m）

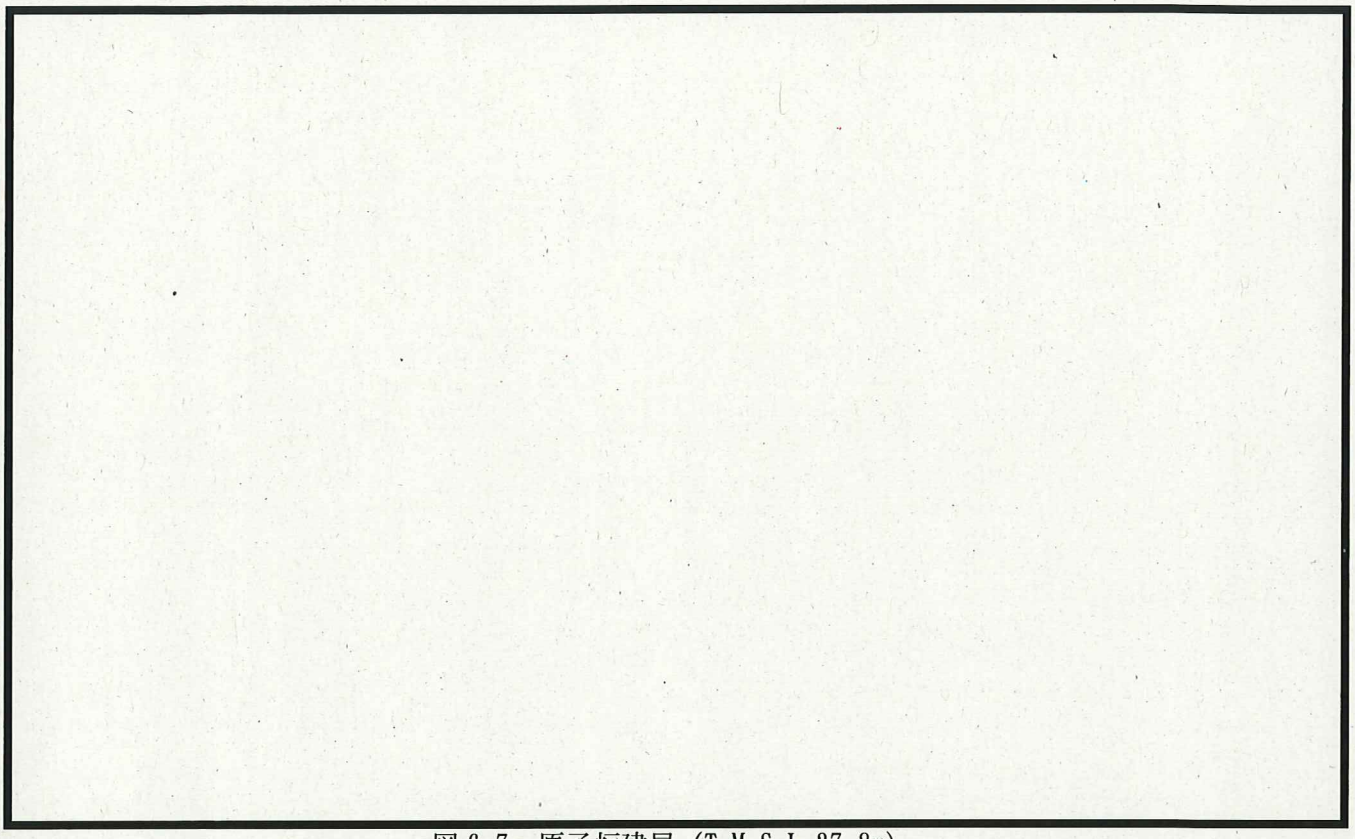


図 6-7　原子炉建屋（T.M.S.L.27.8m）

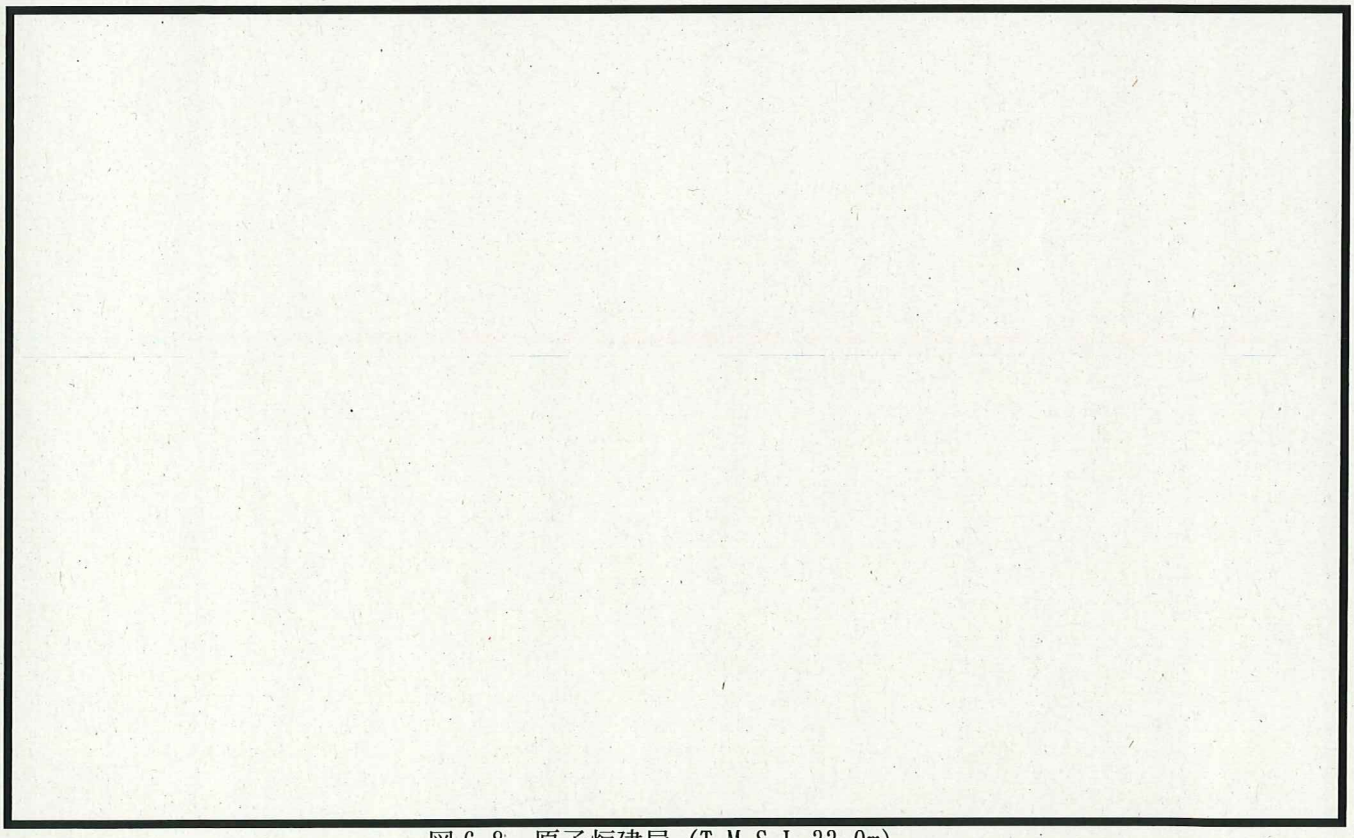


図 6-8　原子炉建屋（T.M.S.L.33.0m）

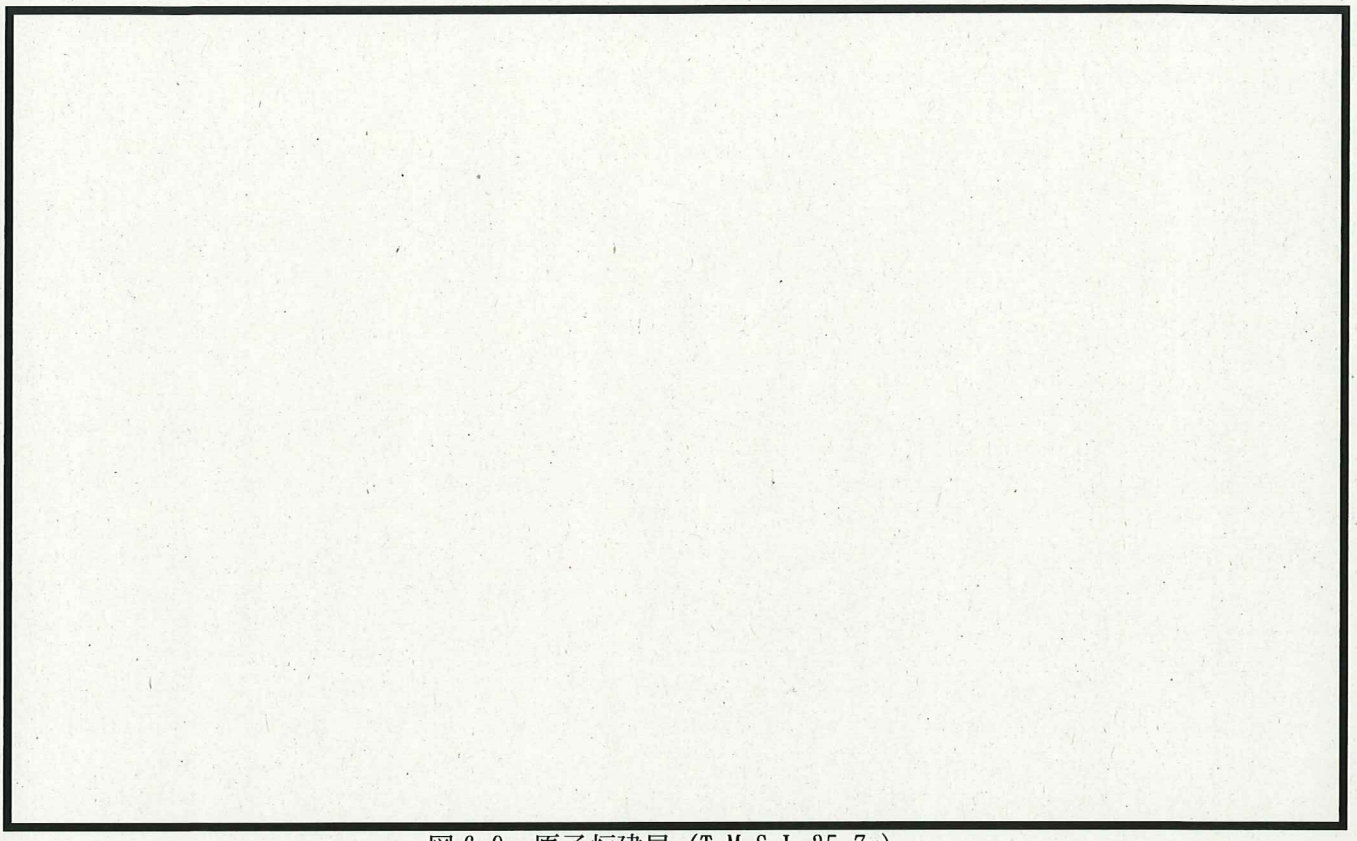


図 6-9　原子炉建屋（T.M.S.L.35.7m）

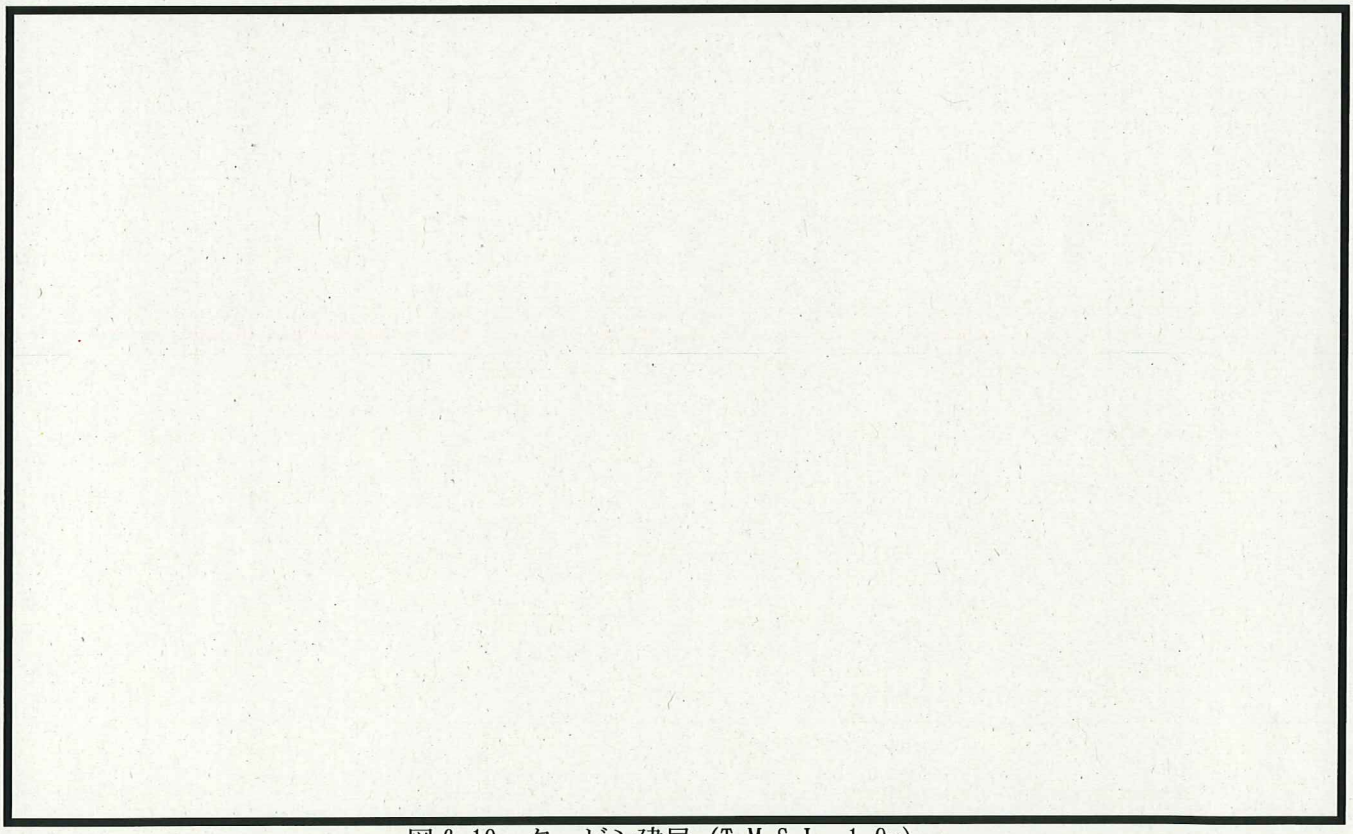


図 6-10　タービン建屋（T.M.S.L.-1.9m）

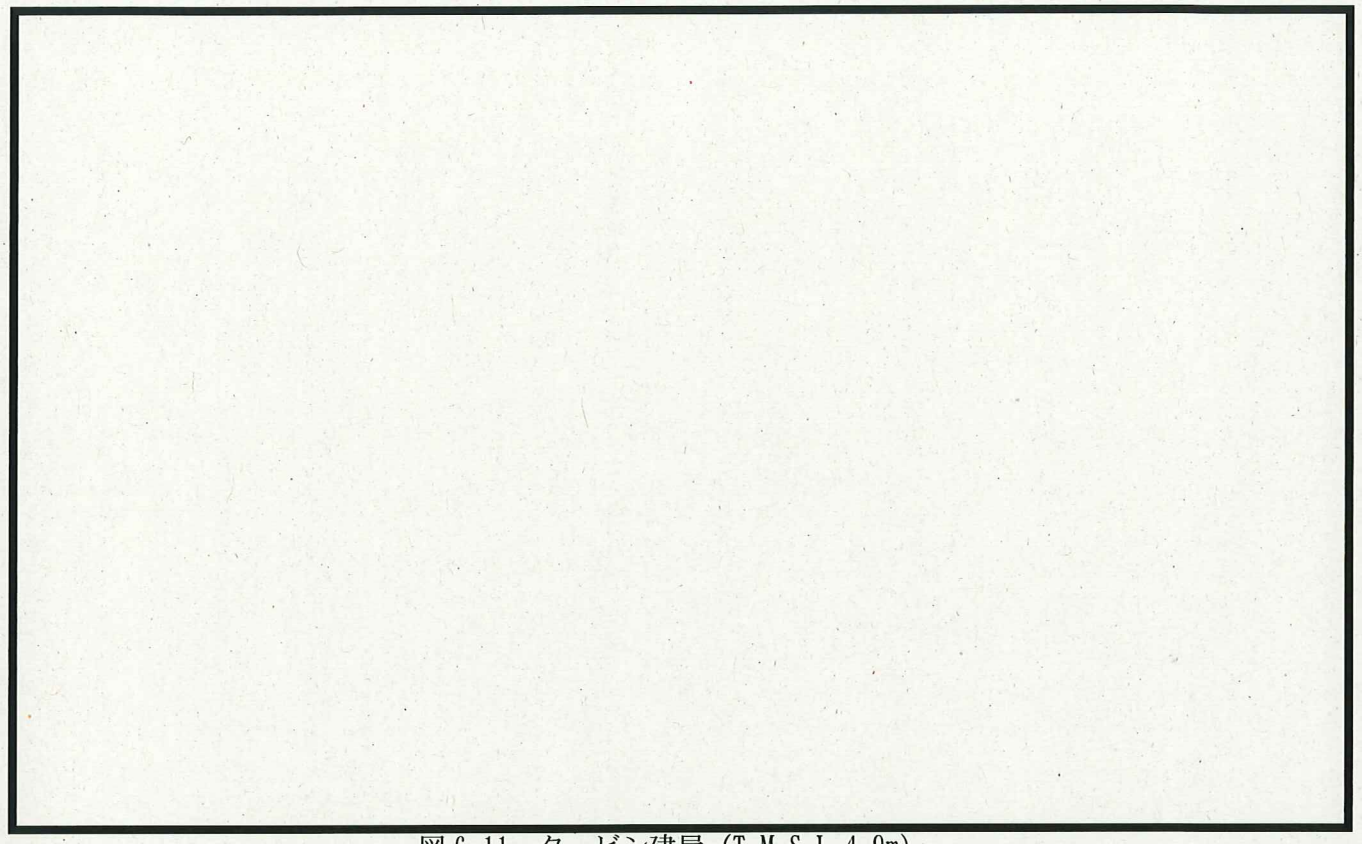


図 6-11　タービン建屋（T.M.S.L.4.9m）

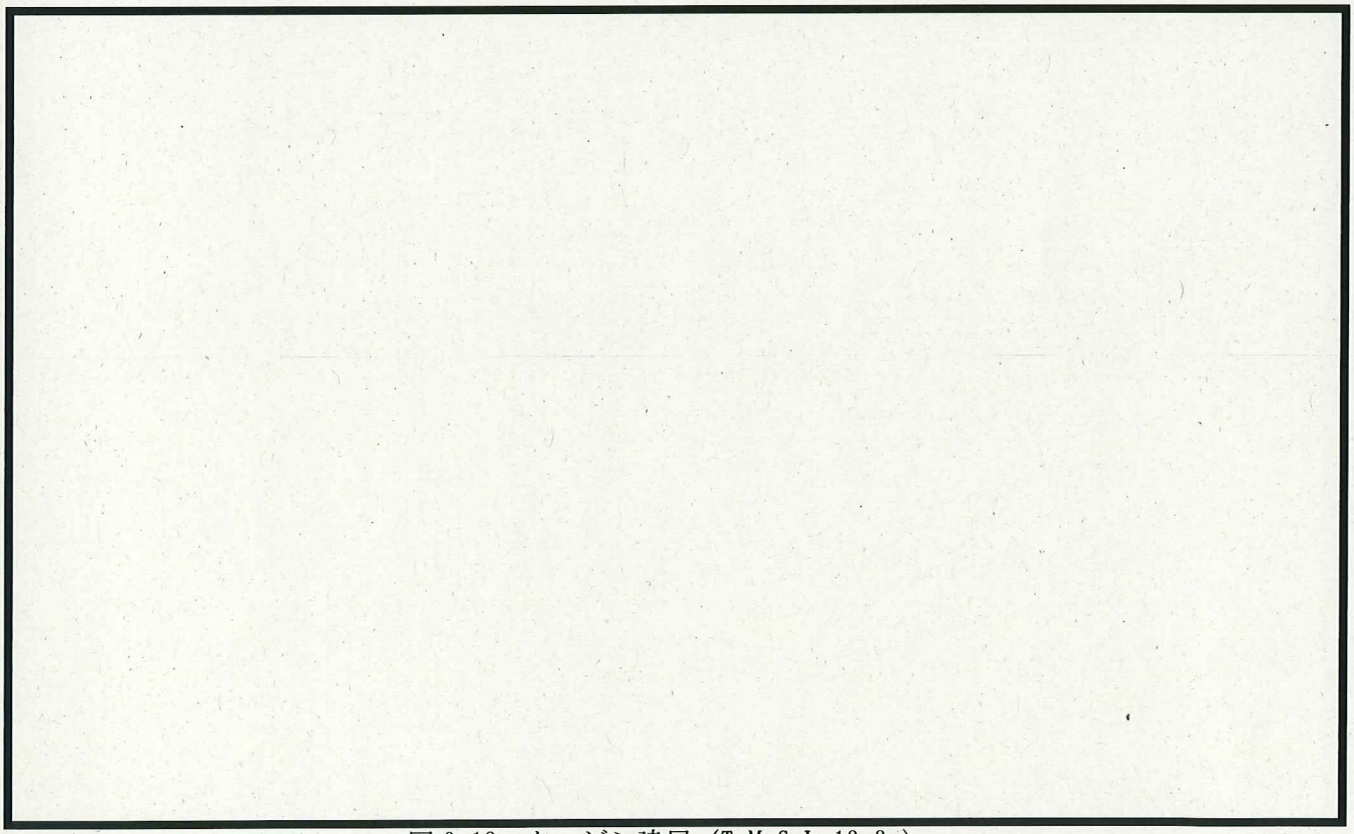


図 6-12　タービン建屋（T.M.S.L.12.3m）

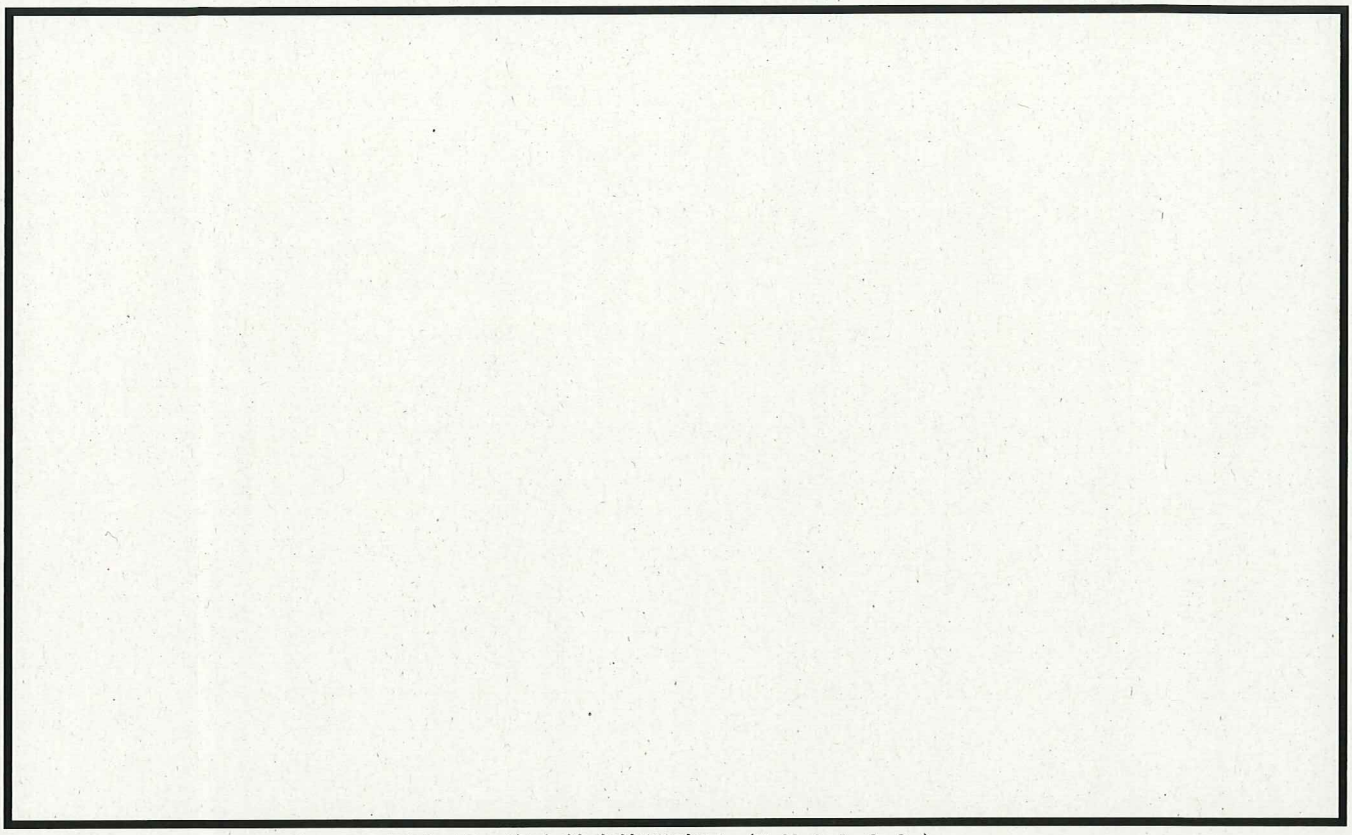


図 6-17　海水熱交換器建屋（T.M.S.L.3.2m）

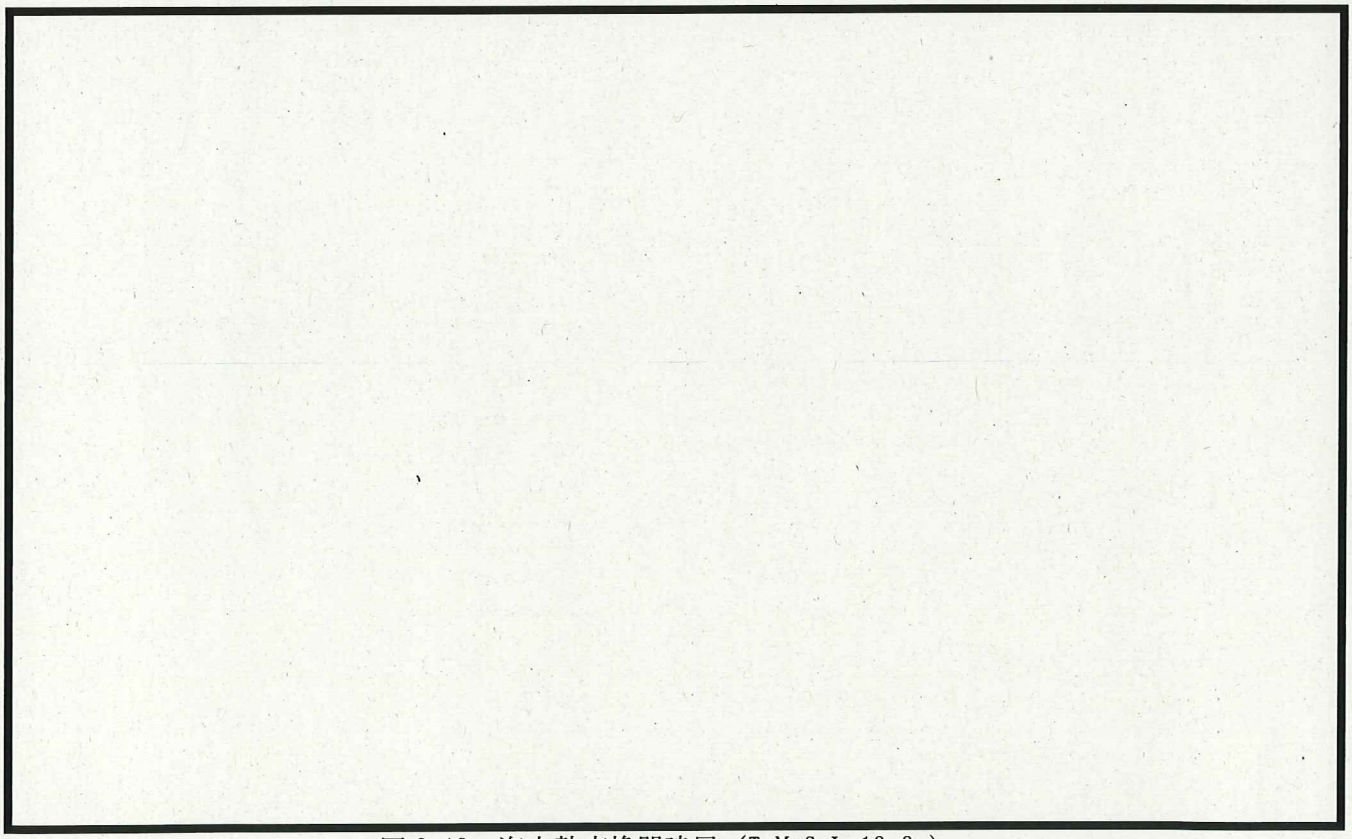


図 6-18　海水熱交換器建屋（T.M.S.L.12.3m）

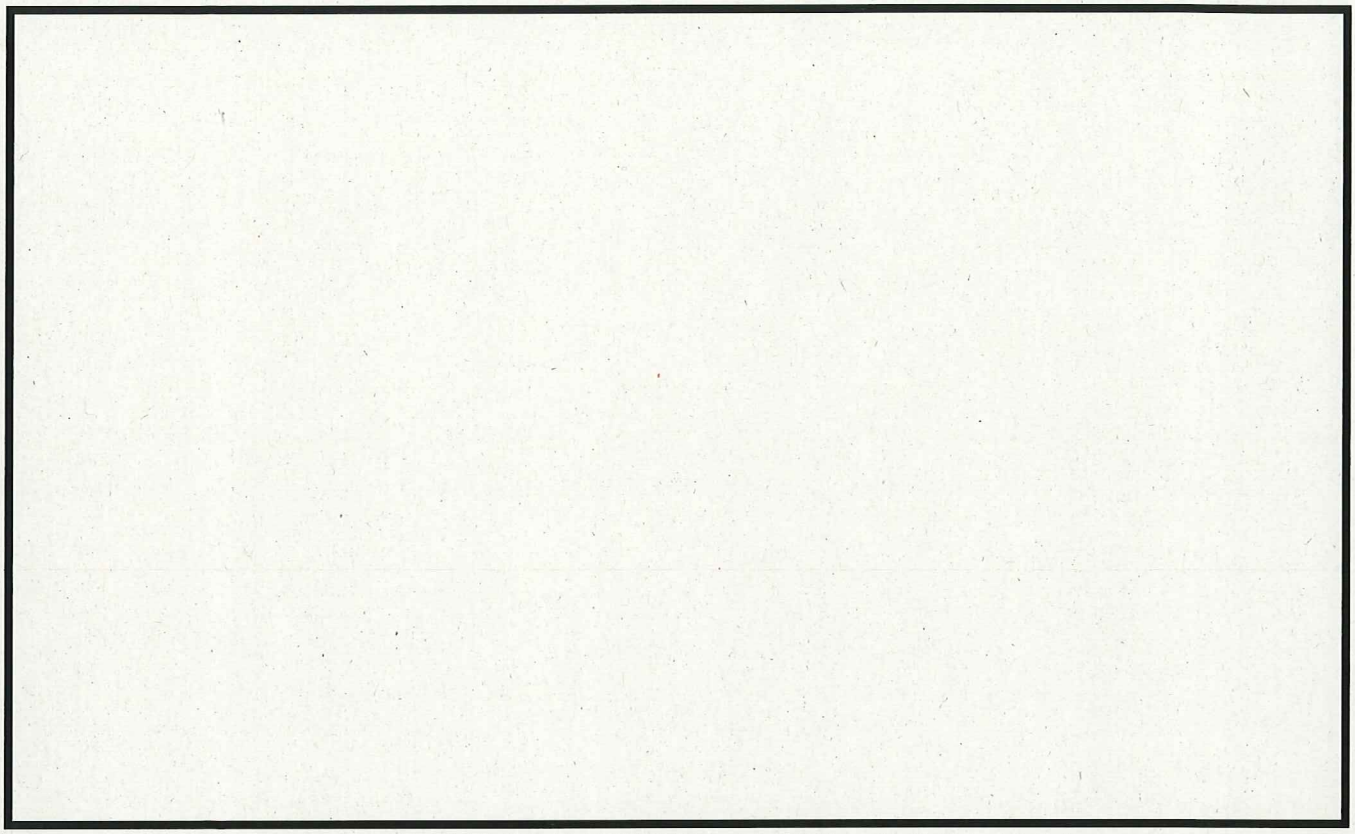


図 6-19　雑固体廃棄物焼却設備建屋（大湊側）（T.M.S.L.12.3m）

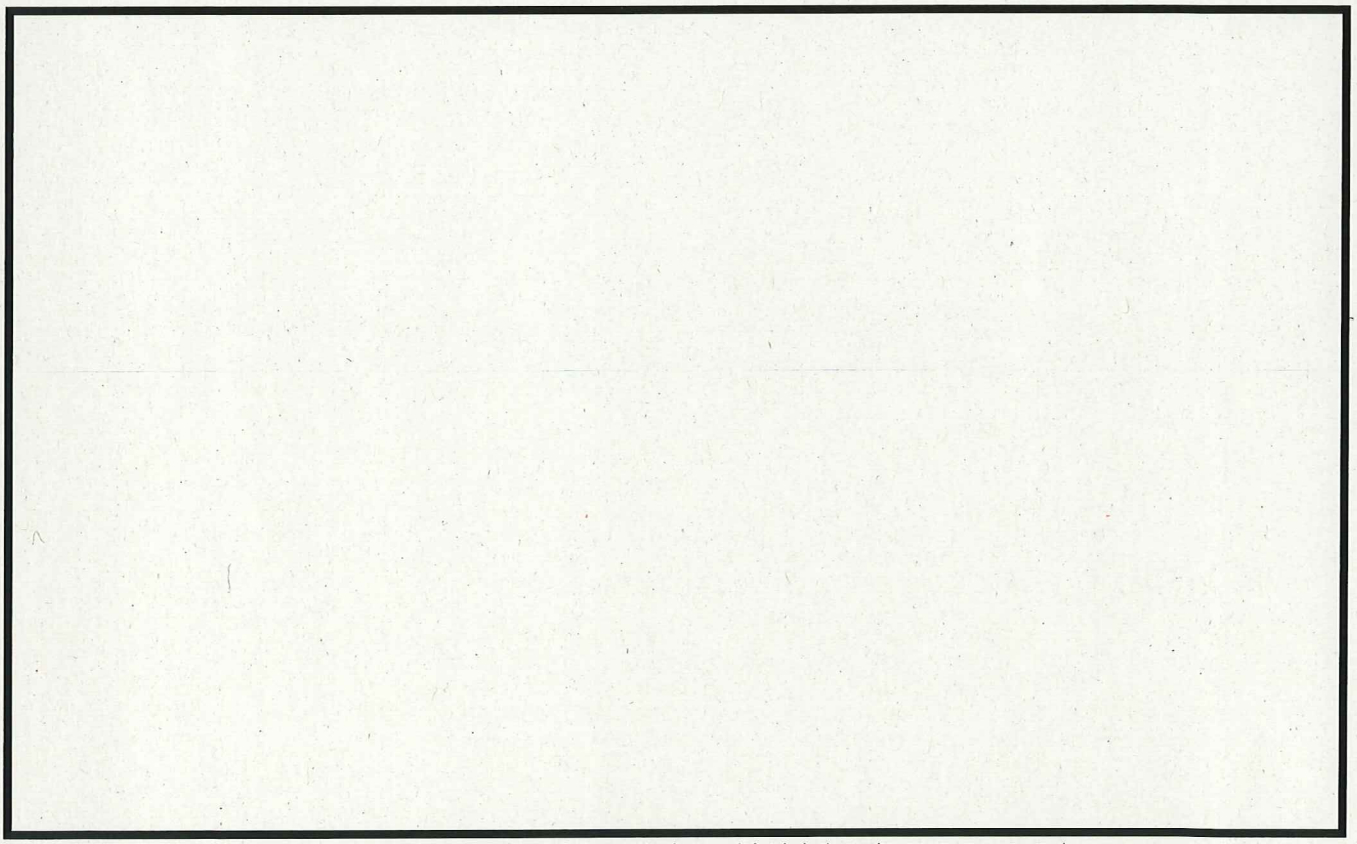


図 6-20　雑固体廃棄物焼却設備建屋（大湊側）（T.M.S.L.18.5m）

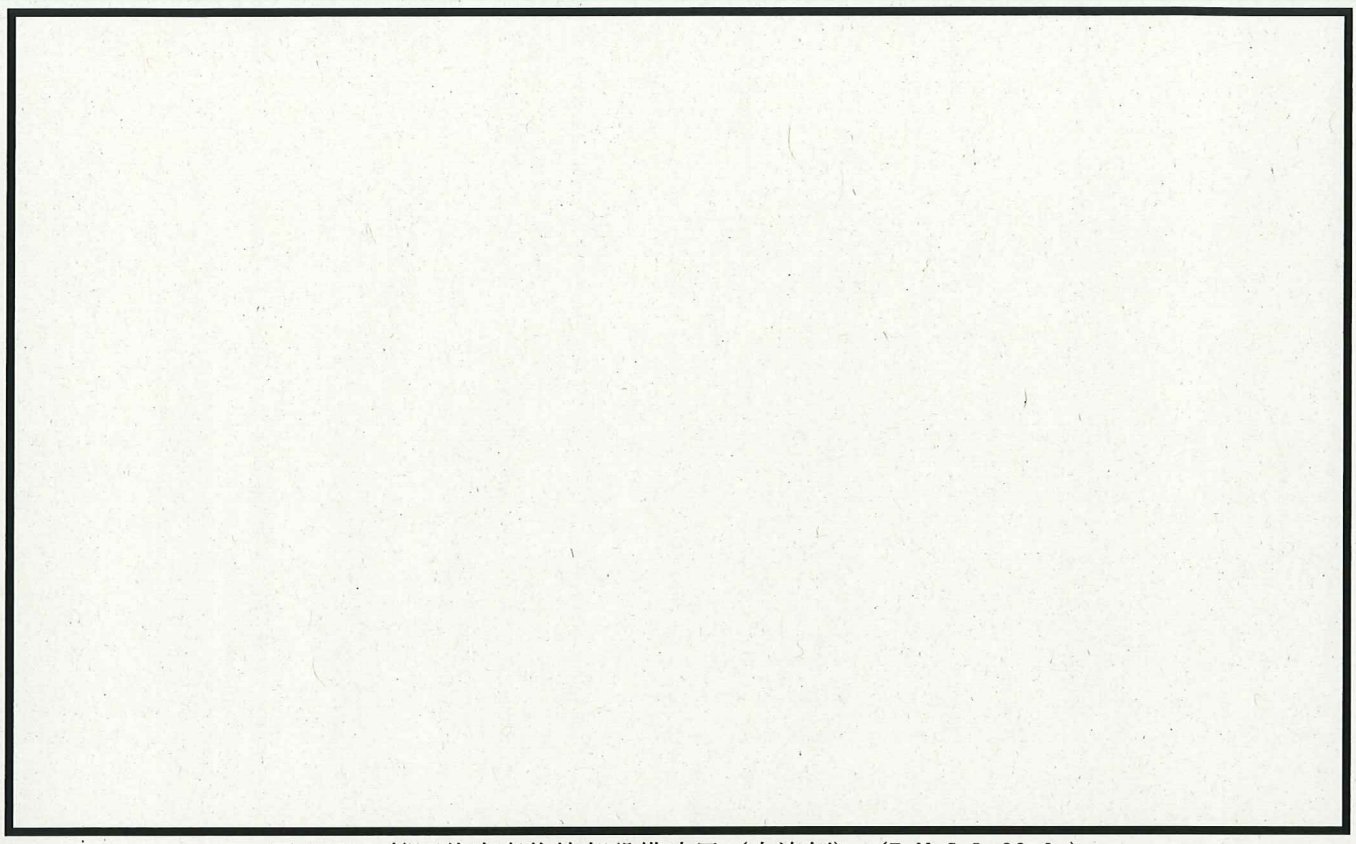


図 6-21　雑固体廃棄物焼却設備建屋（大湊側）（T.M.S.L.23.9m）

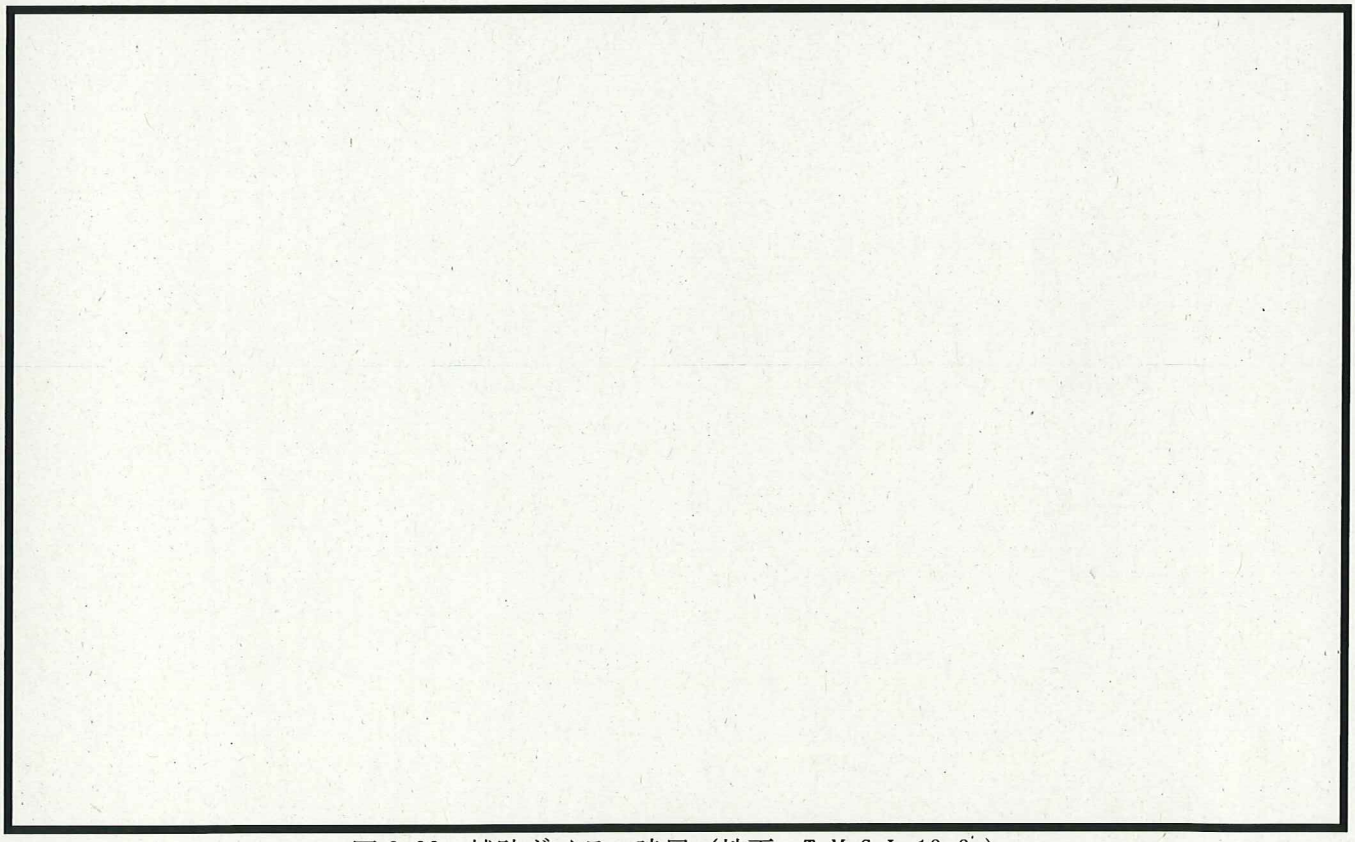


図 6-22　補助ボイラー建屋（地下，T.M.S.L.12.3m）

2. 中性化の評価点の選定過程

コンクリートの中性化深さの実測値及び評価対象部位の選定結果を表6-2に示す。

2.1 屋内

上記の環境測定結果をもとに，仕上げ材の有無も考慮して，中性化が進展しやすい環境下にあると想定される複数箇所を選定し，平成30年に中性化深さを測定した。

表6-2の結果と各建屋の最小かぶり厚さは同一であることを踏まえ，タービン建屋内壁を中性化深さの評価対象部位とし，評価点は，中性化深さの平均値が最大となったタービン建屋南側廊下壁とした。

2.2 屋外

各対象構造物における屋外環境は，ほぼ同一であるが，屋外の評価対象部位抽出にあたり，平成27年，28年及び30年に各構造物の中性化深さを測定した。

表6-2の結果と各建屋の最小かぶり厚さは同一であることを踏まえ，建物においてはタービン建屋外壁を評価対象とした。評価点は，中性化深さの平均値が最大となったタービン建屋１階北側外壁とした。

さらに，構築物は，かぶり厚さの相違を考慮して，非常用ガス処理系配管ダクト，原子炉補機冷却水系配管ダクトＢ系及び排気筒（基礎部）を評価対象とし，評価点は，非常用ガス処理系配管ダクト内壁，原子炉補機冷却水系配管ダクトB系内壁及び排気筒北東基礎とした。

別紙7

＜中性化深さの推定値の算定過程について＞

調査時点及び運転開始後40年経過時点の中性化深さの推定値の算定過程（推定式，条件，パラメータ）を以下に示す。

：中性化深さの推定に必要なパラメータ

：推定結果

1. 岸谷式

	屋内	屋外			
	タービン建屋	タービン建屋	非常用ガス処理系配管ダクト	原子炉補機冷却水系配管ダクトB系	排気筒基礎
	南側廊下	1F北外壁	ダクト内壁	ダクト内壁	北東基礎
x：水セメント比（%）					
α：劣化外力係数の区分による係数	1.7 屋内	1.0 屋外	1.0 屋外	1.0 屋外	1.0 屋外
β：仕上げ材による係数	1.0 仕上げ材なし	1.0 仕上げ材なし	1.0 仕上げ材なし	1.0 仕上げ材なし	1.0 仕上げ材なし
γ：セメントによる係数	1.4 フライアッシュB種	1.4 フライアッシュB種	1.4 フライアッシュB種	1.4 フライアッシュB種	1.4 フライアッシュB種
調査時点の推定値（cm） （運転開始後経過年数）	2.34 （28.6年）	1.38 （28.6年）	1.46 （26.4年）	1.84 （26.4年）	1.38 （28.6年）
運転開始後40年経過時点の推定値（cm）	2.77	1.63	1.80	2.27	1.63

岸谷式　$$t = \frac{7.2}{R^2(4.6x - 1.76)^2} C^2$$

t：期間（年）
C：中性化深さ（cm）
x：水セメント比（$x \leqq 0.6$）

R：中性化速度係数（$R=\alpha\times\beta\times\gamma$）
α：劣化外力の区分による係数
β：仕上げ材による係数
γ：セメントによる係数

2. 森永式

	屋内	屋外			
	タービン建屋	タービン建屋	非常用ガス処理系配管ダクト	原子炉補機冷却水系配管ダクトB系	排気筒基礎
	南側廊下	1F北外壁	ダクト内壁	ダクト内壁	北東基礎
w/c：水セメント比（%）					
R：中性化比率	1.0 打放し	1.0 打放し	1.0 打放し	1.0 打放し	1.0 打放し
C：炭酸ガス濃度（%）*1	0.0408	0.0410	0.0410	0.0410	0.0410
T：温度（℃）*2	21.6	13.9	13.9	13.9	13.9
RH：湿度（%）*2	46.2	71.0	71.0	71.0	71.0
調査時点の推定値（cm） （運転開始後経過年数）	1.20 （28.6年）	0.55 （28.6年）	0.58 （26.4年）	0.73 （26.4年）	0.55 （28.6年）
運転開始後40年経過時点の推定値（cm）	1.42	0.65	0.71	0.90	0.65

*1：平成28年8月から平成29年7月の期間で各月毎に1回測定した結果の平均値
*2：平成28年8月1日から平成29年7月31日の期間で，1時間間隔で連続測定した結果の平均値

森永式

$$x = \sqrt{\frac{C}{5}} \cdot 2.44 \cdot R\,(1.391 - 0.017RH + 0.022\,T) \times (4.6 \times w/c/100 - 1.76) \times \sqrt{t}$$

x：中性化深さ（mm）
C：炭酸ガス濃度（%）
R：中性化比率（−）

T：温度（℃）
RH：湿度（%）
w/c：水セメント比（%）
t：材令（日）

3. 中性化深さの実測値に基づく√t 式

	屋内	屋外			
	タービン建屋	タービン建屋	非常用ガス処理系配管ダクト	原子炉補機冷却水系配管ダクトB系	排気筒基礎
	南側廊下	1F北外壁	ダクト内壁	ダクト内壁	北東基礎
中性化実測深さ（cm）	1.08	0.42	1.91	1.64	0.04
運転開始後40年経過時点の推定値（cm）	1.28	0.50	2.35	2.02	0.04

√t式　　$y = b\sqrt{t}$

y：中性化深さ（mm）
t：中性化期間（年）
b：中性化速度係数（mm/√年）

別紙8

＜塩分浸透における評価点の妥当性について＞

1. 塩化物イオン濃度の測定結果

柏崎刈羽５号炉においては，平成30年に海側に面する壁を有する構造物（原子炉建屋，タービン建屋，海水熱交換器建屋及び排気筒基礎部）を対象に，表8-1に示す通り，塩化物イオン濃度の測定を行ったほか，平成27年に海水や飛沫の影響により最も厳しい塩分浸透環境下にある取水構造物を対象に，表8-2に示す通り，塩化物イオン濃度の測定を行った。

その結果，鉄筋位置における塩化物イオン濃度は，原子炉建屋で0.0017%，タービン建屋で0.0027%，海水熱交換器建屋で0.0010%，排気筒基礎部で0.0008%，取水構造物で気中帯0.0048%，干満帯0.0052%，海中帯0.0033%であった。

以上の結果と塩分浸透環境を考慮して，タービン建屋外壁と，取水構造物を評価対象部位とし，評価点は，タービン建屋は１階東側外壁，取水構造物は塩分浸透環境を考慮し，気中帯，干満帯及び海中帯とした。

表8-1　鉄筋位置における塩化物イオン濃度測定結果（建物及び排気筒基礎部）

構造物（箇所）	コア記号	試料採取位置 [mm]	塩化物イオン量(CL^-)の平均値 A [kg/m^3]	コンクリートの密度 B [kg/m^3]	塩化物イオン濃度 [%]	
					コア別 A/B	3本平均値
原子炉建屋（3F西外壁）	5R-6-①	40～60	0.01	2280	0.0005	0.0012
	5R-6-②	40～60	0.05	2280	0.0020	
	5R-6-③	40～60	0.02	2280	0.0010	
原子炉建屋（1F南外壁）	5R-9-①	40～60	0.05	2310	0.0020	**0.0017**
	5R-9-②	40～60	0.02	2350	0.0010	
	5R-9-③	40～60	0.05	2330	0.0020	
タービン建屋（1F北外壁）	5T-7-①	40～60	0.02	2310	0.0010	0.0007
	5T-7-②	40～60	0.01	2310	0.0005	
	5T-7-③	40～60	0.01	2290	0.0005	
タービン建屋（1F東外壁）	5T-8-①	40～60	0.15	2310	0.0065	**0.0027**
	5T-8-②	40～60	0.02	2310	0.0010	
	5T-8-③	40～60	0.01	2330	0.0005	
海水熱交換器建屋（1F西外壁）	5Hx-2-①	40～60	0.02	2320	0.0010	**0.0010**
	5Hx-2-②	40～60	0.02	2320	0.0010	
	5Hx-2-③	40～60	0.02	2290	0.0010	
排気筒（北東基礎）	STK-1-①	60～80	0.02	2290	0.0010	**0.0008**
	STK-1-②	60～80	0.01	2180	0.0005	
	STK-1-③	60～80	0.02	2230	0.0010	

注）**太字**：評価書記載値

表8-2　鉄筋位置における塩化物イオン濃度測定結果（取水構造物）

構造物（箇所）	コア記号	試料採取位置 [mm]	塩化物イオン量(CL^-)の平均値 A [kg/m³]	コンクリートの密度 B [kg/m³]	塩化物イオン濃度 [%]	
					コア別 A/B	3本平均値
取水構造物（気中帯）	①	80～100	0.12	2305	0.0052	**0.0048**
	②	80～100	0.09	2265	0.0040	
	③	80～100	0.12	2369	0.0051	
取水構造物（干満帯）	①	80～100	0.12	2392	0.0050	**0.0052**
	②	80～100	0.16	2352	0.0068	
	③	80～100	0.09	2332	0.0039	
取水構造物（海中帯）	①	80～100	0.07	2337	0.0030	**0.0033**
	②	80～100	0.09	2340	0.0038	
	③	80～100	0.07	2347	0.0030	

注）**太字**：評価書記載値

2. 取水構造物における評価点の範囲

気中帯,干満帯及び海中帯は1964年3月から1980年12月までの柏崎港における潮位観測記録に気象偏差を考慮して設定している。

上記期間における柏崎港の朔望平均満潮位，朔望平均干潮位は，以下の通りである。

・朔望平均満潮位：T.M.S.L.+0.50m

・朔望平均干潮位：T.M.S.L.+0.05m

これに気象偏差の最大値（0.48m 1972年12月2日発生）を考慮して干満帯の範囲を以下の通り設定している。

・設計満潮位＝朔望平均満潮位＋気象偏差の最大値＝0.5m＋0.48m＝0.98m≒1.00m（T.M.S.L.+1.00m）

・設計干潮位＝朔望平均干潮位＝0.05m≒0.00m（T.M.S.L.±0.00m）

気中帯，干満帯及び海中帯の範囲と評価点（以下，「コア採取位置」という。）を表8-3に示す。

表8-3　取水構造物における評価点の範囲とコア採取位置*1

	評価点の範囲	コア採取位置
気中帯	T.M.S.L.+1.00m 以上	T.M.S.L.+2.25m
干満帯	T.M.S.L.+1.00m 未満，T.M.S.L.±0.00m 以上	T.M.S.L.+0.95m
海中帯	T.M.S.L.±0.00m 未満	T.M.S.L.-4.40m

*1　コア径：55.5mm

気中帯，干満帯及び海中帯のコア採取位置は，気中帯では設計満潮位以上，干満帯では設計満潮位未満かつ設計干潮位以上，海中帯では設計干潮位未満，の範囲内となっている。よって，コアは適切な位置から採取しており，評価点は妥当であると判断した。

別紙9

＜塩分浸透における鉄筋の腐食減量の算定過程について＞

1. 鉄筋の腐食減量の算定過程
方法，条件及びパラメータを以下に示す。

	タービン建屋	取水構造物		
	①1F東外壁	②気中帯	③干満帯	④海中帯
t_n：供用開始からの経過年数(年)	28.6	25.6	25.6	25.6
Cl_{tn}：鉄筋位置における塩化物イオン量(kg/m³) *1	0.060	0.110	0.123	0.077
C_0：コンクリート表面の塩化物イオン量(kg/m³) *2	0.39	18.436	21.008	10.685
D_c：コンクリート中の塩化物イオンの見かけ上の拡散係数(cm²/年) *2	0.133	0.090	0.224	0.172
Cl_{tn}：鉄筋位置における塩化物イオン量(kg/m³)(推定値) *3	0.000 ～0.085	0.000 ～0.032	0.000 ～0.992	0.000 ～0.252
c：かぶり(mm) *4	40	84	84	84
d：鉄筋径(mm) *4	22	32	32	32
W/C：水セメント比(%/100) *5				
T：温度(℃) *6	13.9	13.9	13.9	17.0
RH：相対湿度(%) *7	71	71	100	100
O：酸素濃度(%/100) *8	0.21	0.21	0.21	0.0071
V_{11tn}：調査時点の鉄筋の腐食減量($\times 10^{-4}$g/cm²)	4.7	1.6	7.4	0.0
$V_{11(40)}$：運転開始後40年経過時点の鉄筋の腐食減量($\times 10^{-4}$g/cm²)	6.5	2.5	11.3	0.0
Q_{cr}：かぶりコンクリートにひび割れが発生する時点の鉄筋の腐食減量 推定値($\times 10^{-4}$g/cm²)	48.8	91.5	91.5	91.5

：拡散方程式により，コンクリート表面からの塩化物イオンの浸透を予測するのに必要なパラメータ
：予測結果
：森永式により，鉄筋の腐食減量の評価を実施するのに必要なパラメータ
：推定結果

*1：鉄筋位置における経過年数tn(年)の塩化物イオン量の平均値
*2：コンクリート表面からの深さと塩化物イオン量の関係の実測値をFickの第二法則に与え，最小二乗法からC_0とD_cを算定した
*3：運転開始から40年経過時点までの各年の推定値
*4：①：竣工図より
②～④：配筋図より，芯かぶり=100mm，100-32/2=84mmと設定
*5：①～④：工事記録より
*6：①～③：理科年表 2018年版より，1981～2010年の新潟平均値
④：日本海洋データセンターHPより，柏崎刈羽を含む北緯37°～38°，東経138°～139°の水温の平均値（深度は10mとした）
*7：①,②：理科年表 2018年版より，1981～2010年の新潟平均値
③：干満作用により湿った状態が継続すると考え，海中と同じ条件とした
④：湿潤状態であることからR.H.100%とした
*8：一般的な大気中及び海中の酸素濃度として設定

1.1　拡散方程式

コンクリート表面からの深さと塩化物イオン量の関係の実測値を下式（Fickの第二法則の解の式）に与え，最小二乗法から表面塩化物イオン量（C_0）と見かけの拡散係数（D_c）を算定する。

$$Cl_{tn} = C_0\left(1-\mathrm{erf}\frac{0.1c}{2\sqrt{D_c\cdot t_n}}\right)$$

Cl_{tn}：鉄筋位置における経過年数t_n(年)の塩化物イオン量（kg/m³）
C_0　：コンクリート表面における塩化物イオン量（kg/m³）
D_c　：コンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数（cm²/年）
c　：かぶり（mm）
t_n　：供用開始からの経過年数（年）
erf　：誤差関数

1.2　森永式

(1) 腐食量の算定

経過年数t_n年（1, 2, 3…）ごとに腐食速度V_{1tn}(mg/cm²/年)を算出した結果を累加し，その経過年時点における腐食減量(mg/cm²)を求める。

$$V_{1tn} = V_{11tn}\times\frac{V_{12tn}}{V_{12tn}'}$$

$$V_{11tn} = \frac{d}{10\cdot c^2}\left[-0.51-6.81\cdot Cl_{tn}+44.97\cdot(W/C)^2+60.84\cdot Cl_{tn}\cdot(W/C)^2\right]$$

$$V_{12tn} = \frac{1}{10}\left(2.59-0.05\cdot T-6.89\cdot H-22.87\cdot O-0.89\cdot Cl_{tn}+0.14\cdot T\cdot H+0.51\cdot T\cdot O\right.$$
$$\left.+0.01\cdot T\cdot Cl_{tn}+60.81\cdot H\cdot O+3.01\cdot H\cdot Cl_{tn}+6.55\cdot O\cdot Cl_{tn}\right)$$

$$V_{12tn}' = \frac{1}{10}(0.56528+1.2808\cdot Cl_{tn})$$

V_{1tn}　：経過年数t_n年における腐食速度(mg/cm²/年)
V_{11tn}　：温度15℃，湿度69%，酸素濃度20%における腐食速度(mg/cm²/年)
V_{12tn}　：ペーストコーティング鉄筋の腐食速度(mg/cm²/年)
V_{12tn}'　：温度15℃，湿度69%，酸素濃度20%におけるペーストコーティング鉄筋の腐食速度(mg/cm²/年)
d　：鉄筋径(mm)
c　：かぶり(mm)
Cl_{tn}　：経過年数t_n年における鉄筋位置の塩化物イオン量(kg/m³)
W/C　：水セメント比(%／100)
T　：温度(℃)
H　：湿度に関する項　[H＝(RH－45)／100]
RH　：相対湿度(%)
O　：酸素濃度(%／100)

(2) ひび割れ発生の限界腐食量の算定方法

(1)の１年ごとの腐食速度の累積値が下式による限界腐食量を越える経過年数を，鉄筋腐食によるひび割れが発生する時点として評価を行う。

$$Qcr = 0.602\left(1+\frac{2c}{d}\right)^{0.85}\times d$$

Qcr　：ひび割れ発生時の腐食量（mg/cm²）
c　：かぶり（mm）
d　：鉄筋径（mm）