

伊方発電所第1号機
タービン発電機架台のひび割れに関する
安全評価結果等について

平成14年10月
四国電力株式会社

目 次

1. 伊方発電所第1号機タービン発電機架台のひび割れに関する 経緯及びこれまでの自主安全評価結果	1
(1) 経 緯	1
(2) ひび割れの状況等	1
(3) 原因究明	2
(4) 安全評価結果	2
(5) 今後の対応	4
2. 伊方発電所のコンクリート構造物に発生している安全確保上 評価が必要なひび割れ等の調査結果	5
(1) 調査対象のコンクリート構造物	5
(2) 調査方法	6
(3) 調査結果	6
(4) 今後の対応	7
3. 安全協定確認書改定以前に発見された傷等が現存し、 安全確保上その進行の監視等を継続しているものの調査結果	8

1. 伊方発電所第1号機タービン発電機架台のひび割れに関する経緯及びこれまでの自主安全評価結果

伊方発電所第1号機（以下、「伊方1号機」という。）のタービン発電機架台（以下、「タービン架台」又は「架台」という。）は、昭和52年の運転開始後、昭和54年にタービン発電機軸受部の隙間変化、昭和57年に架台梁側面のひび割れが認められたため、原因調査を行った結果、昭和62年にアルカリ骨材反応^(※)によるコンクリートの劣化と推定されたことから、この変形に対する安全評価等を継続的に行い、問題ないことを確認している。

※「アルカリ骨材反応」；コンクリートの骨材に含まれる反応性シリカ鉱物や非晶質ガラスなどとセメントに含まれるアルカリが水の存在等の条件下で化学反応をおこし、コンクリートが膨張する現象をいう。

（1）経緯

昭和50年のタービン架台コンクリート打設完了から現在までの経緯は以下のとおりである。

- ・昭和50年 架台コンクリート打設完了
- ・昭和52年 営業運転開始
- ・昭和54年 タービン発電機の軸受部における軸方向の隙間変化を確認
- ・昭和57年 最初のひび割れを架台梁側面で確認し、変形等の計測開始
- ・昭和57年 ひび割れの部分補修を実施
～60年
- ・昭和61年 コンクリートコア採取調査
- ・昭和62年 原因をアルカリ骨材反応であると推定
- ・昭和63年 安全評価（フレイム解析）実施
- ・平成元年 コンクリートコア採取調査
- ・平成4年 コンクリートコア採取調査
- ・平成10年 再安全評価（有限要素法解析）実施
- ・平成14年 ひび割れ補修を一部実施、コンクリートコア採取調査
（タービン架台の変形は、平成3年頃以降ほぼ収束）

（2）ひび割れの状況等

タービン架台のひびはテーブルデッキ部に認められ、その状況は添付資料－1のとおりである。

ひびの最大長さは約5m、最大幅は約3mmであるが、平成3年頃より新たなひびの発生は僅かであり、また、ひびの大きな進展は特に見られない。

さらに、架台変位の経年変化状況は添付資料－2に示すとおり、平成3年頃以降ほぼ収束した状態であると判断できる。

（添付資料－1，2）

また、タービン架台から採取したコンクリートコアの圧縮強度については、最初に調査を行った昭和61年以降、4回の調査において、いずれも設計基準強度^(※) (210kgf/cm²)を上回っている。

(添付資料－3, 4)

※「設計基準強度」；設計時に安全上必要とされた強度

(3) 原因究明

以下の検討結果により、タービン架台のひび割れはアルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化であるものと推定された。

- a. 伊方1号機で用いた骨材は、アルカリ骨材反応を起こす可能性を否定できない安山岩であり、また、セメントのアルカリ度も高かったものと推定され、アルカリ骨材反応を起こす因子を有していた。
- b. 架台周辺は、アルカリ骨材反応が促進されやすい高温・高湿度の環境であった。
- c. ひび割れ形状の目視判断の結果、アルカリ骨材反応の特徴とされている亀甲状などのひび割れが認められ、さらにコンクリートコアを分析した結果、アルカリ骨材反応の特徴を示す圧縮強度、静弾性係数の低下及び測定膨張量の増加が認められるとともに、コア観察により、骨材そのものにひび割れが認められた。

(添付資料－3, 4, 5, 6)

(4) 安全評価結果

a. 解析結果

アルカリ骨材反応によるタービン架台の変形が、架台の強度に与える影響を評価するため、昭和63年にフレーム解析、平成10年に有限要素法解析を実施した。

(a) フレーム解析結果（昭和63年実施）

タービン架台の柱及び梁をフレーム（骨組）モデルに置き換え、架台の伸びを強制変位として与え、荷重（長期荷重、水平方向地震力等）により発生する各部の曲げモーメントやせん断力を計算する手法による架台の強度評価を実施した。

その結果、昭和61年当時の架台の伸び（32.0mm）に対して、柱1箇所許容値を超える箇所が認められ、また、伸びの予想収束値（73.4mm）に対しては、柱や梁の局部に許容値を超える箇所が認められたが、コンクリートコアの試験結果等も踏まえて総合的に評価した結果、架台の伸びが60mm程度であれば健全性は確保できると判断した。

(添付資料－7)

(b) 有限要素法解析結果（平成10年実施）

タービン架台をタービン軸方向を対象として有限要素法モデルに置き換え、架台の伸びを強制変位として与え、荷重（長期荷重、水平方向地震力等）により発生する各部の応力を計算する手法による架台の強度評価を実施した。

その結果、平成8年当時の架台の伸び（37.6mm）及び伸びの予想収束値（56.0mm）に対して許容値を満足しており、地震時も含め強度上問題ないことを確認し、架台の健全性は確保できると判断した。

（添付資料－8）

b. タービン発電機の安全性

(a) タービン発電機の運転管理状況

タービン発電機の運転時の軸振動値に異常は認められず、また、軸方向隙間等の管理状況についても、過去10年間以上、架台の変形による影響は認められていない。

ア. タービン発電機運転時の軸振動値

運転開始以降、軸振動値は良好な値で推移しており、平成13年の芸予地震時においても軸振動値は変化せず通常運転状態が維持され、その後もタービン発電機の運転状態に異常は認められていない。

（添付資料－9）

イ. タービン発電機軸方向隙間及び軸芯調整

(ア) 軸方向隙間調整

架台の変形により、発電機軸受の励磁機側隙間が徐々に小さくなってきたためタービンと発電機間の接続部のスペーサを厚くし、軸長さを調整しているが、昭和63年頃（第9回定検）以降は軸方向の隙間の測定値も落ち着いており、調整も行っていない。

（添付資料－10、11）

(イ) 軸芯調整

タービン発電機は、分解点検毎にロータや軸受を吊り出すことから、組立時は軸芯の調整を行い、必要に応じて軸受の位置を微調整することにより良好な運転状態を継続している。

(b) タービンミサイル発生の可能性

タービンミサイルは、以下のとおり、現実的には発生しないものと考えている。

- ・伊方1号機のタービンは、信頼性の高い材料を使用しており、更に十分な設計、製作、据付及び運転段階での管理を行っており、タービンが壊れる可能性は極めて少ない。
- ・タービン発電機の軸振動は、運転中、常時監視しており、その値が0.3mm以上になれば自動停止する。また、定格回転数の111%（1,998回転／分）になっても自動停止する設計となっている。
- ・大地震が発生した場合もタービン発電機は、地震加速度大又は軸振動大信号により、安全に自動停止する。
- ・万一、何らかの要因で動翼が、静翼又は車室に接触することにより破損したと仮定しても、その外側にある車室等の構造物を突き破るだけのエネルギーは保有していないことから、動翼は車室を貫通することはない、タービンミサイルが発生することはない。

(5) 今後の対応

以上のとおり、タービン発電機の安全性を確保する上で問題は認められないが、長期的な安定運転の観点から以下の対策を実施する。

a. 架台の健全性を維持するための補修の実施

- ・水分混入防止（充てん材注入、表面モルタル塗装等）
- ・反応の抑制（亜硝酸リチウム^(※)の注入等）

※「亜硝酸リチウム」；亜硝酸イオンには鉄筋防錆機能があり、リチウムイオンにはアルカリ骨材反応抑制機能がある。

b. 架台状況確認の充実

従来から実施している計測（架台変形量、ひび割れの進展状況、採取コアの調査等）に加え、架台の剛性が変化すれば架台振動に影響が出ると考えられることから、新たに振動測定装置を設置し、管理の強化を図る。また、アルカリ骨材反応は、高温・高湿度の環境下で促進されることから、環境条件を把握できるよう、架台周辺の温度及び湿度測定装置もあわせて設置する。

（添付資料－12）

c. 架台の構造解析の実施

最新の知見を反映した架台の構造解析を実施する。

2. 伊方発電所のコンクリート構造物に発生している安全確保上評価が必要なひび割れ等の調査結果

タービン架台以外の構造物に関しても定期的に点検を実施し、健全性を確認しており、安全確保上問題が生じないよう適切に管理している。

今般、愛媛県及び伊方町からの要請も踏まえて、過去の点検記録等の再点検を実施するとともに、伊方発電所内のコンクリート構造物全般について、目視により確認可能な範囲で総点検を実施した結果、安全確保上評価が必要なひび割れはなかった。

今回実施した点検の結果は次のとおりである。

(1) 調査対象のコンクリート構造物

主 要 建 家	原子炉格納容器内部、原子炉格納容器外周コンクリート壁、原子炉補助建家、原子炉建家、タービン建家
屋 外 施 設	変圧器基礎、脱気器基礎、取水設備、放水設備、タンク基礎、配管ダクト、ケーブルダクト、擁壁、護岸、他
付 属 建 家	屋内開閉所、固体廃棄物貯蔵庫、雑固体焼却炉建家、機材保管庫、蒸気発生器保管庫、純水装置建家、海水淡水化装置建家、総合排水処理装置建家、他

(2) 調査方法

調査対象のコンクリート構造物について、以下の調査を実施した。

- ・過去の点検記録等を確認し、アルカリ骨材反応と判定されたひび割れを抽出し、ひび割れの進展を確認する。
- ・目視点検により、ひび割れ、剥離、白華現象^(※)及びさび汁の付着を抽出し、アルカリ骨材反応に特徴的な亀甲状などのひび割れや膨張による目地の食い違い等に着目して、アルカリ骨材反応の徴候の有無を判断する。
- ・安全確保上の評価の必要性について検討する。

※「白華現象」；コンクリートやモルタルの中のカルシウム分が水分等により溶解され表面にしみ出し、空気中の炭酸ガスと化合してできた白色の物質が析出した状態をいう。

(3) 調査結果

a. アルカリ骨材反応に起因するひび割れの状況

- (a) 過去の点検記録等を確認し、アルカリ骨材反応と判定されている以下のコンクリート構造物については、ひび割れにほとんど進展はなく安全確保上問題のないことを確認した。

(添付資料－13)

場 所	状 況
伊方1号機起動変圧器基礎	基礎の端部に亀甲状のひび割れが認められるが、変圧器の機能には影響を与えない。
伊方1号機脱気器架台基礎	格子状の軽微なひび割れが認められるが、機器の機能には影響を与えない。
伊方1, 2号機放水口壁面	亀甲状のひび割れが認められるが、プラント運転に影響する構造物ではない。
伊方1号機屋外北側擁壁	
伊方1, 2号機純水装置床面	格子状のひび割れが認められるが、機器の基礎部ではなく、装置の機能には影響を与えない。

- (b) 今回の総点検において、以下のコンクリート構造物にアルカリ骨材反応の徴候を示すひび割れが認められたが、いずれも軽微又は局所的であり、安全確保上問題ないことを確認した。

(添付資料－14)

場 所	状 況
伊方1号機タービン建家床面	広範囲に不規則なひび割れが認められるが、機器の基礎部ではなく、機器の機能には影響を与えない。
擁 壁（平ばえ台等）	局所的に線状及び亀甲状のひび割れが認められるが、プラント運転に影響する構造物ではない。
護 岸	
防波堤	
伊方1，2号機総合排水処理装置油分離槽	局所的に不規則なひび割れが認められるが、仕上げ材のひび割れと推定され、装置の機能には影響を与えない。

b. アルカリ骨材反応に起因しないひび割れの状況

アルカリ骨材反応に起因しないひび割れ等については、いずれも軽微又は局所的であり、安全確保上問題のないことを確認した。

(添付資料－15)

(4) 今後の対応

過去の点検記録及び今回の点検結果等から、コンクリート構造物のひび割れについては、いずれも安全確保上問題のないことを確認した。

また、今後とも、コンクリート構造物について、毎年1回、外観目視点検を継続して行い、アルカリ骨材反応と判定されている部位及び徴候が確認された部位については、進展状況を確認し、適切な維持管理を行うこととする。

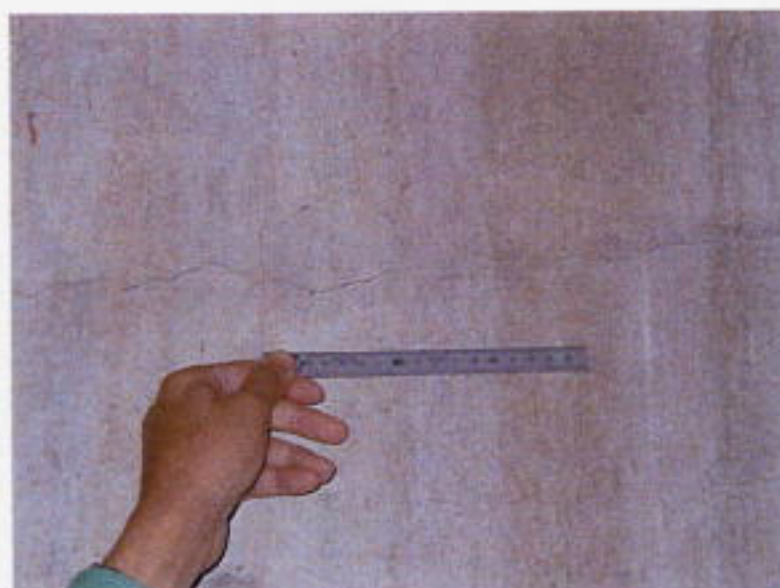
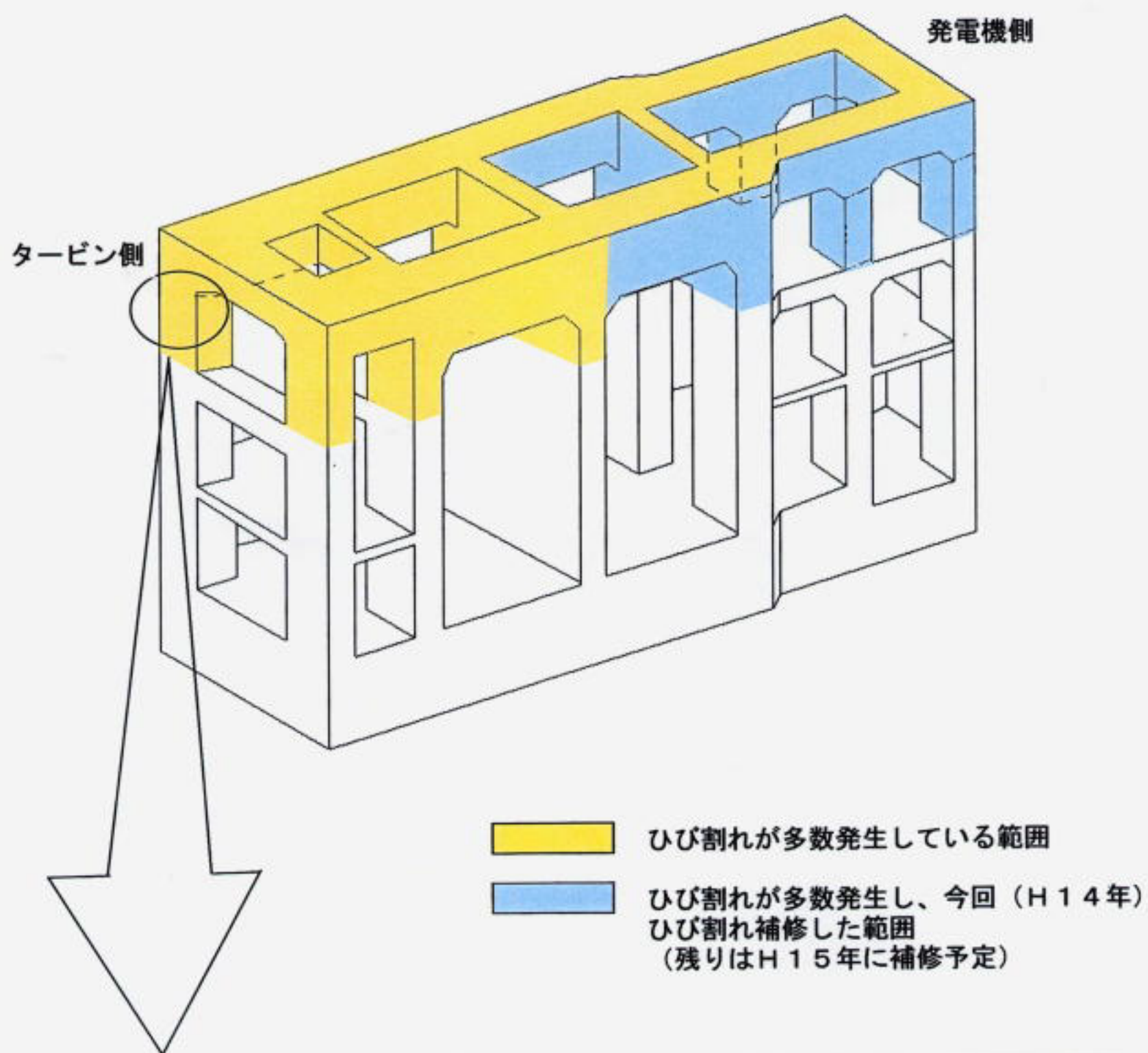
3. 安全協定確認書改定以前に発見された傷等が現存し、安全確保上その進行の監視等を継続しているものの調査結果

今回の伊方1号機のタービン架台のひび割れ事例のように、傷等が現存し安全確保上その進行の監視等を継続しているものはない。

なお、プラント設備については、定期検査時等に各種データを採取し、その傾向を管理しているものがある。例えば、2次系の蒸気配管や熱交換器伝熱管の減肉状況の確認等があるが、これらは、漏えいに至る前の安全上十分な裕度のある範囲で予防保全対策として取替・補修を行っているものであり、該当する事例ではない。

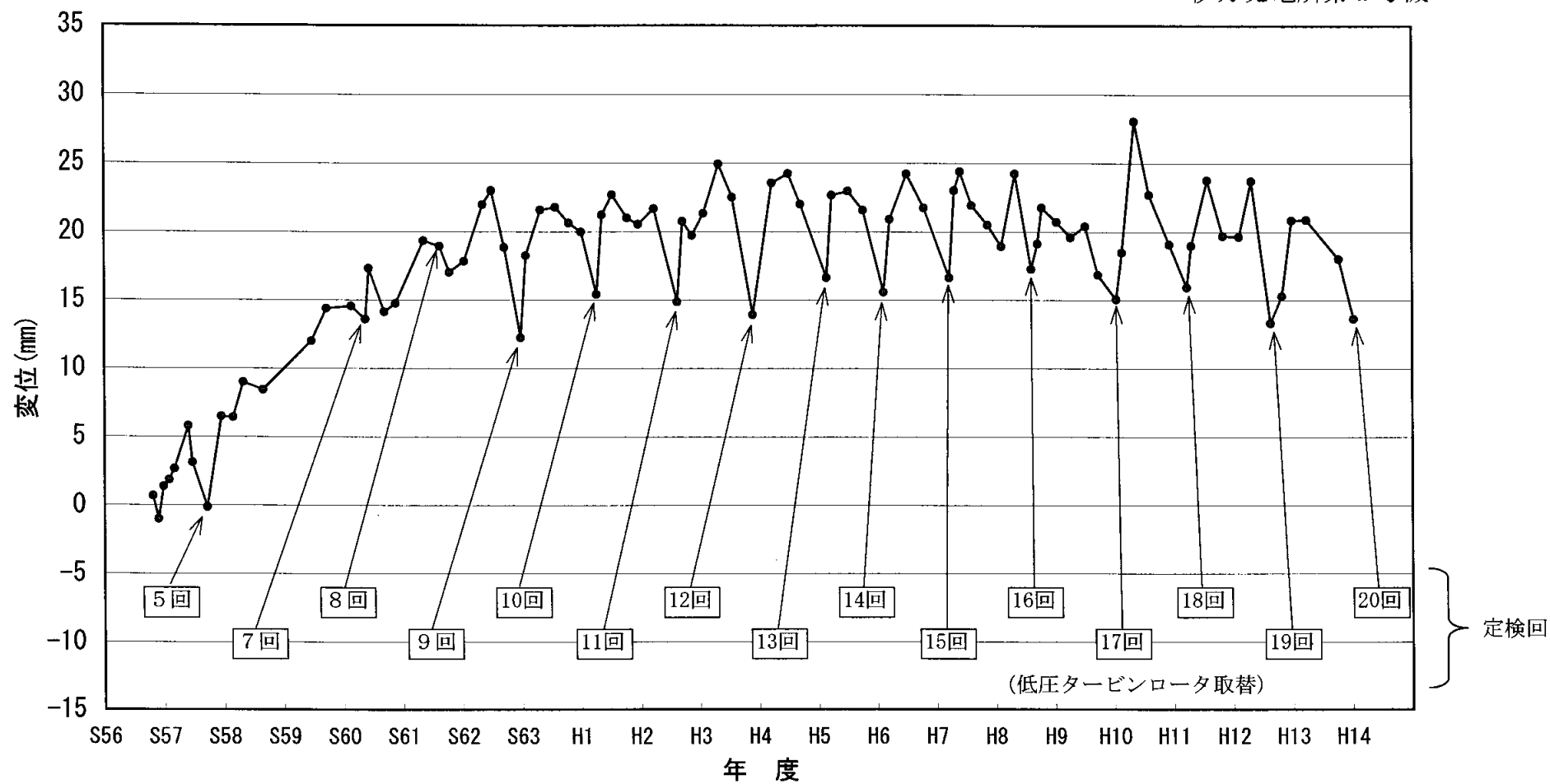
以 上

タービン発電機架台のひび割れの状況

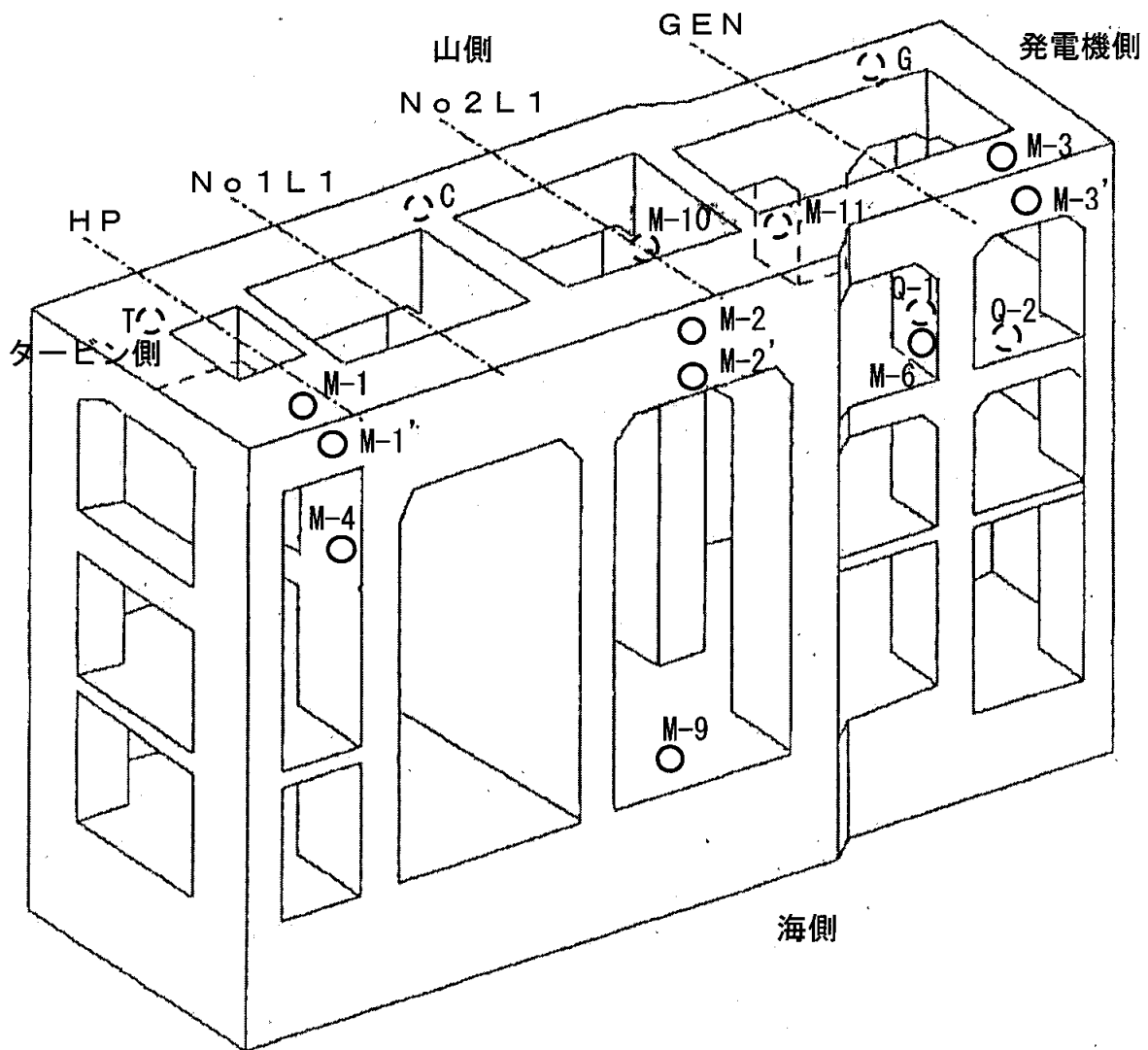


タービン発電機架台の変位量の推移

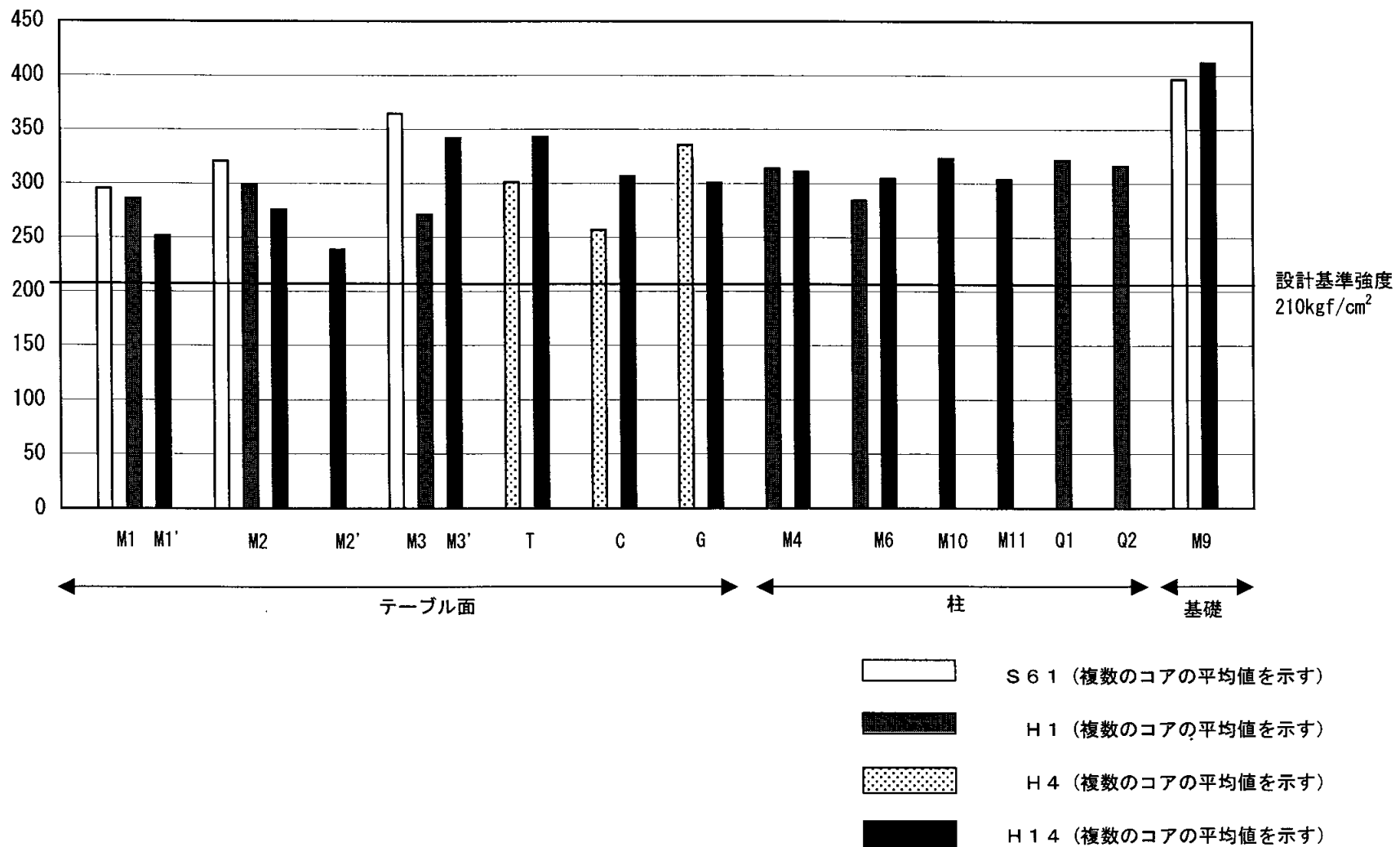
伊方発電所第1号機



採取コア場所説明図

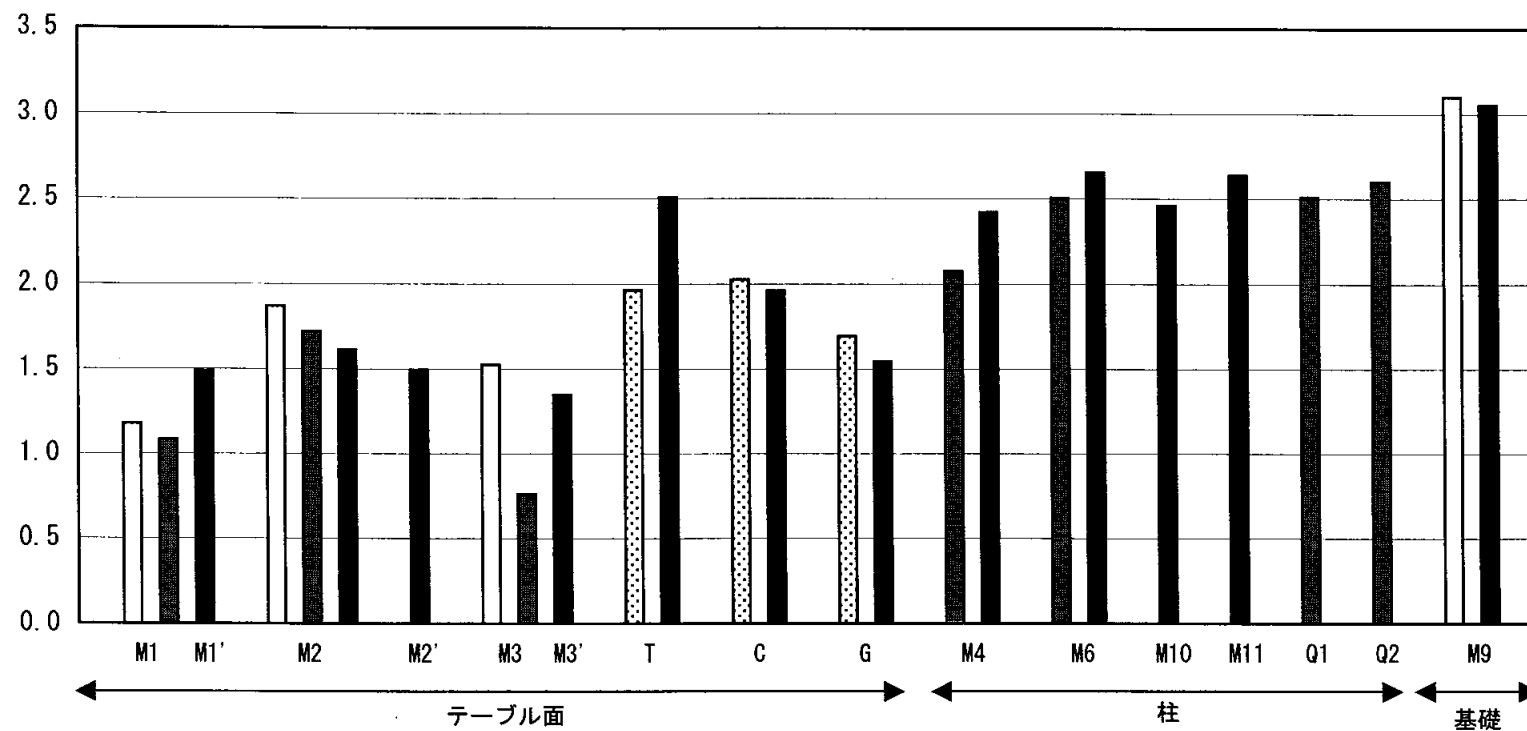


圧縮強度 (kgf/cm²)



採取コアの圧縮強度

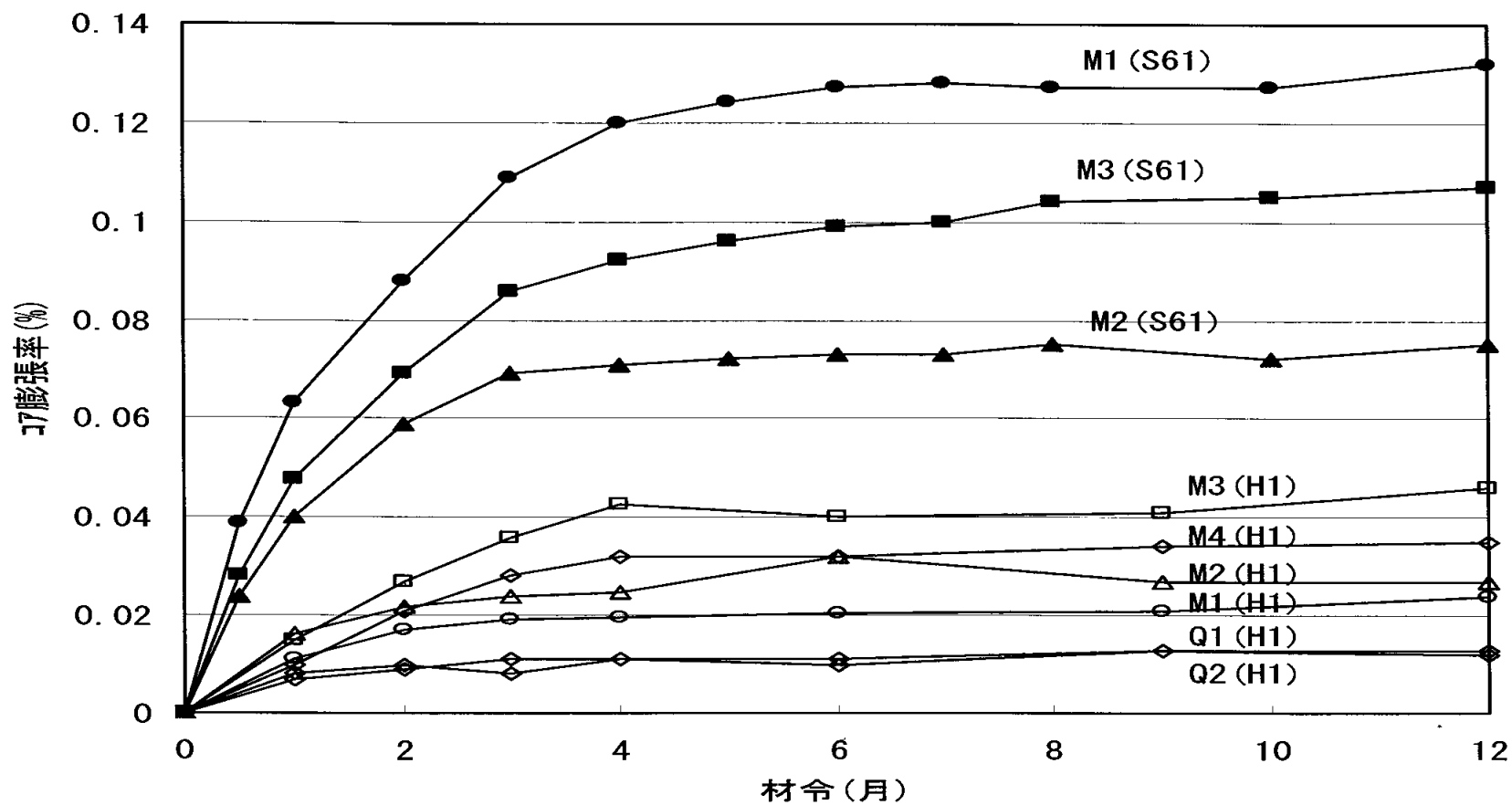
静弾性係数 ($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)



- S 6 1 (複数のコアの平均値を示す)
- H 1 (複数のコアの平均値を示す)
- H 4 (複数のコアの平均値を示す)
- H 1 4 (複数のコアの平均値を示す)

採取コアの静弾性係数

海側採取コア



採取コアの残存膨張率

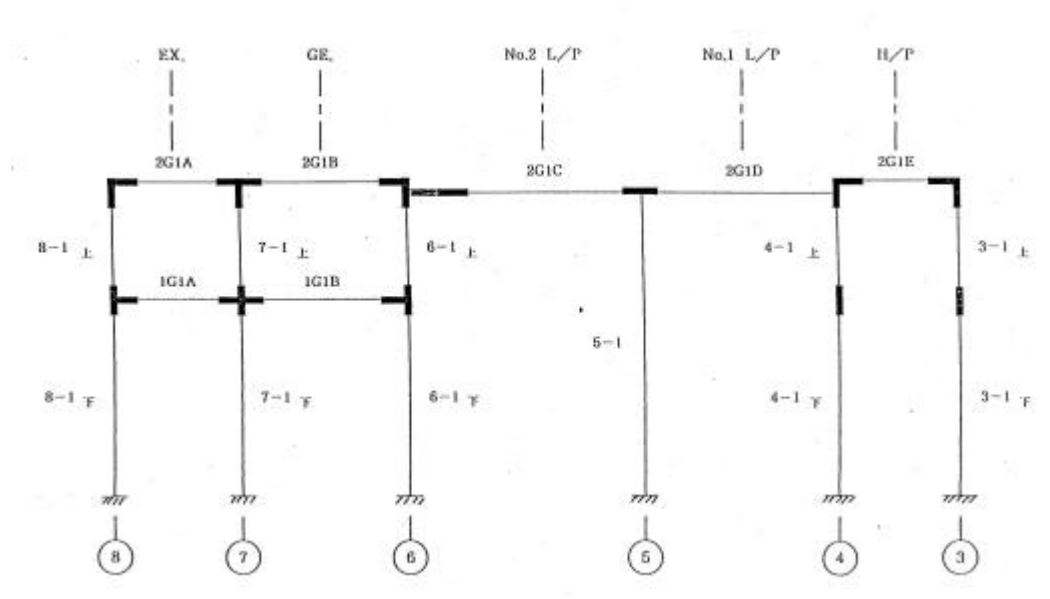
昭和 6 3 年に実施した安全評価の概要

1. 解析方法

(1) 解析モデル

コンクリートのクリープ効果を考慮した 2 次元梁モデルにより解析を実施した。

タービン架台の 2 次元梁モデル図



(2) 荷重条件

a. 長期荷重

架台自重、タービン発電機重量、復水器真空吸引力、熱膨張等、通常運転中架台に加わる荷重を考慮した。

b. 短期荷重

長期荷重に加え、耐震 C クラス^(※) 相当の水平地震力を考慮した。

c. アルカリ骨材反応による伸び

昭和 61 年当時の伸び 32.0mm 及び伸びの予想収束値 73.4mm を考慮した。

※ 「耐震 C クラス」；発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針における耐震設計の重要度分類

2. 解析結果

伸び量 32.0mm に対して、柱 1 箇所許容値を超える箇所が認められた。

伸びの予想収束値 73.4mm に対しては、発電機側及び高圧タービン側の部材の一部に許容値を超える部位が認められた。

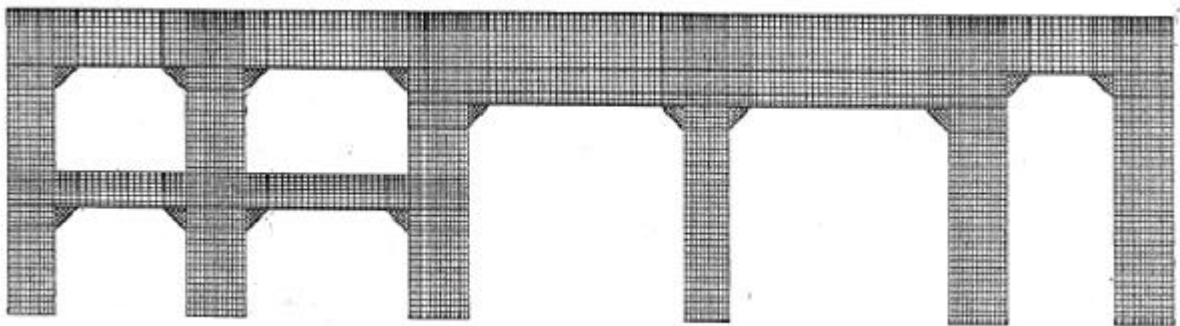
平成10年に実施した安全評価の概要

1. 解析方法

(1) 解析モデル

タービン架台の鉄筋及びコンクリートをタービン軸方向に対象な要素に分割し、2次元FEM（有限要素法）により解析を実施した。

タービン架台の要素分割図（コンクリート部）



(2) 荷重条件

a. 長期荷重

架台自重、タービン発電機重量、復水器真空吸引力、熱膨張等、通常運転中架台に加わる荷重を考慮した。

b. 短期荷重

長期荷重に加え、耐震Cクラス^(※)相当の水平地震力を考慮した。

c. アルカリ骨材反応による伸び

平成8年当時の伸び 37.6mm 及び伸びの予想収束値 56.0mm を考慮した。

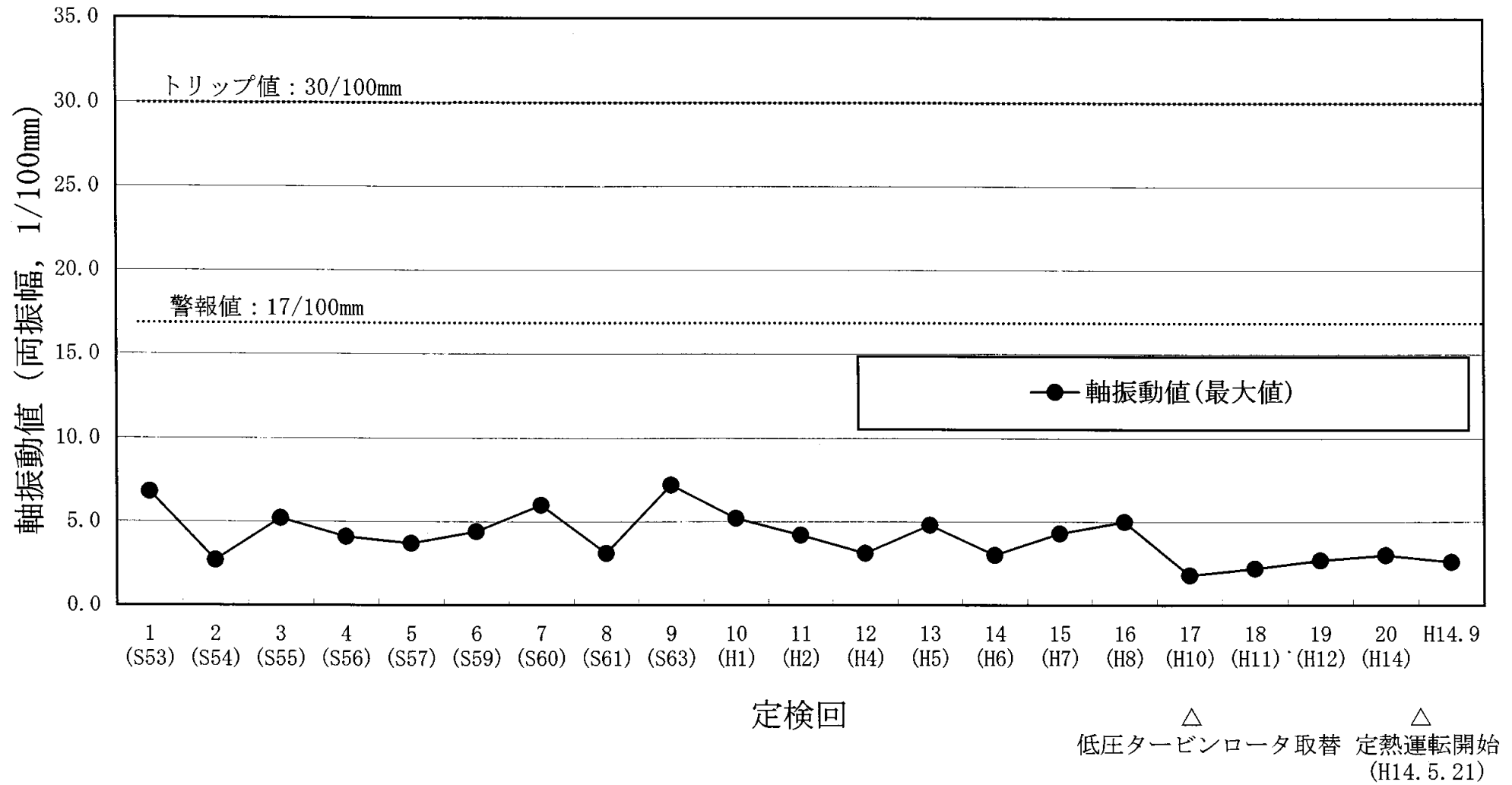
※「耐震Cクラス」；発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針における耐震設計の重要度分類

2. 解析結果

アルカリ骨材反応による伸びの予想収束値 56.0mm に対して、許容値を超える部位は認められなかった。

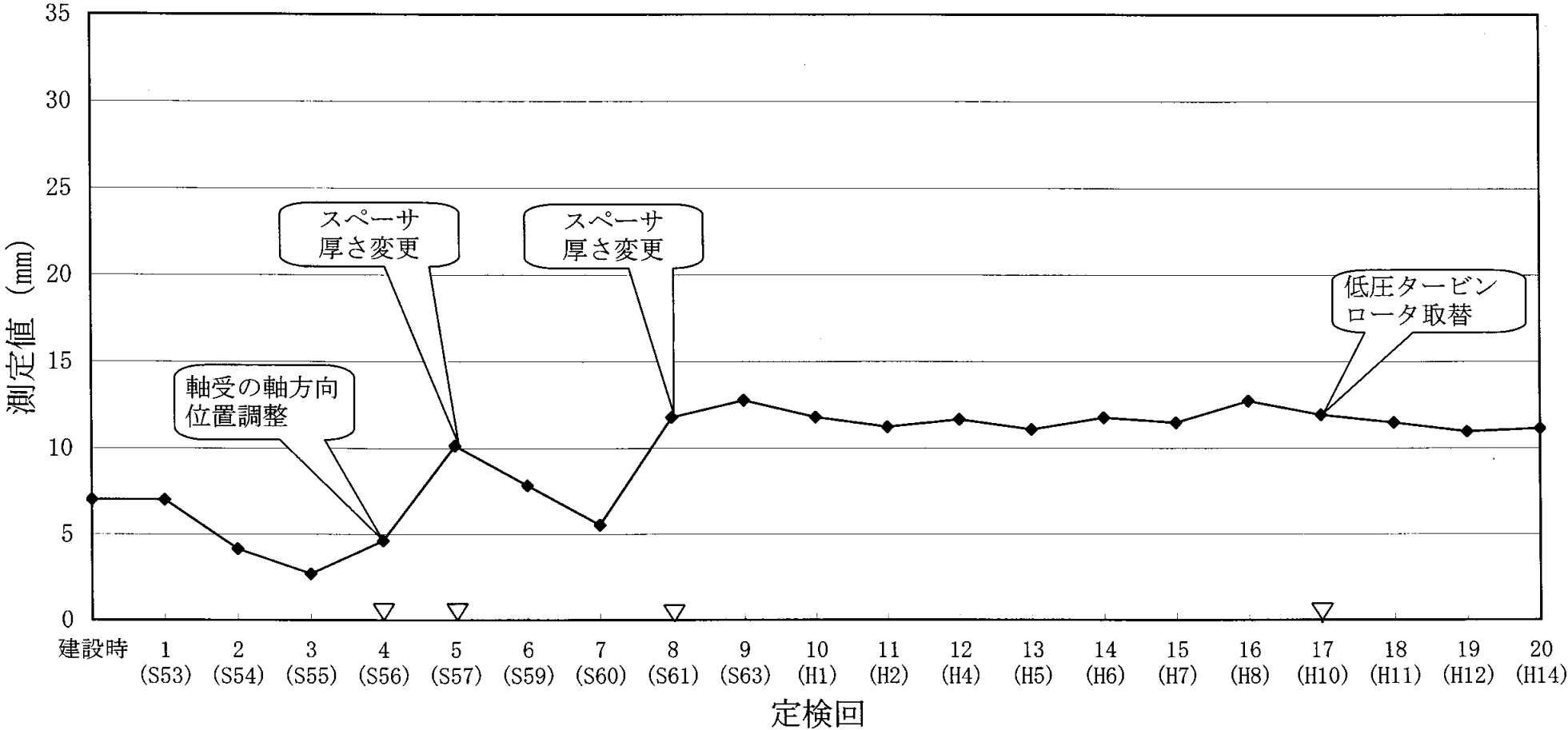
タービン発電機軸振動の推移

伊方発電所第1号機

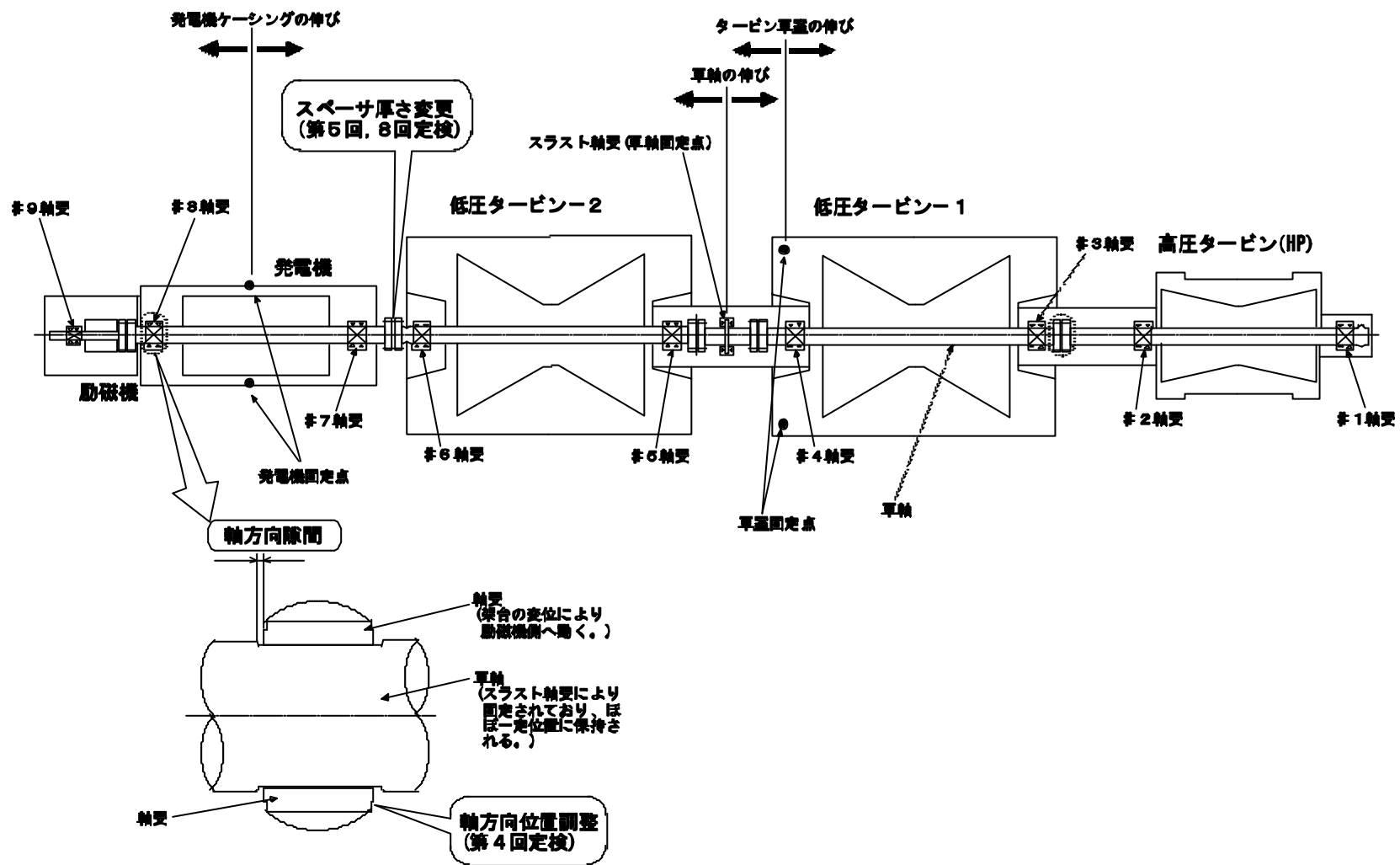


タービン発電機軸受部における軸方向の隙間の推移

伊方発電所第1号機



※軸受の軸方向位置調整、スペーサ厚さ変更については添付資料-11参照

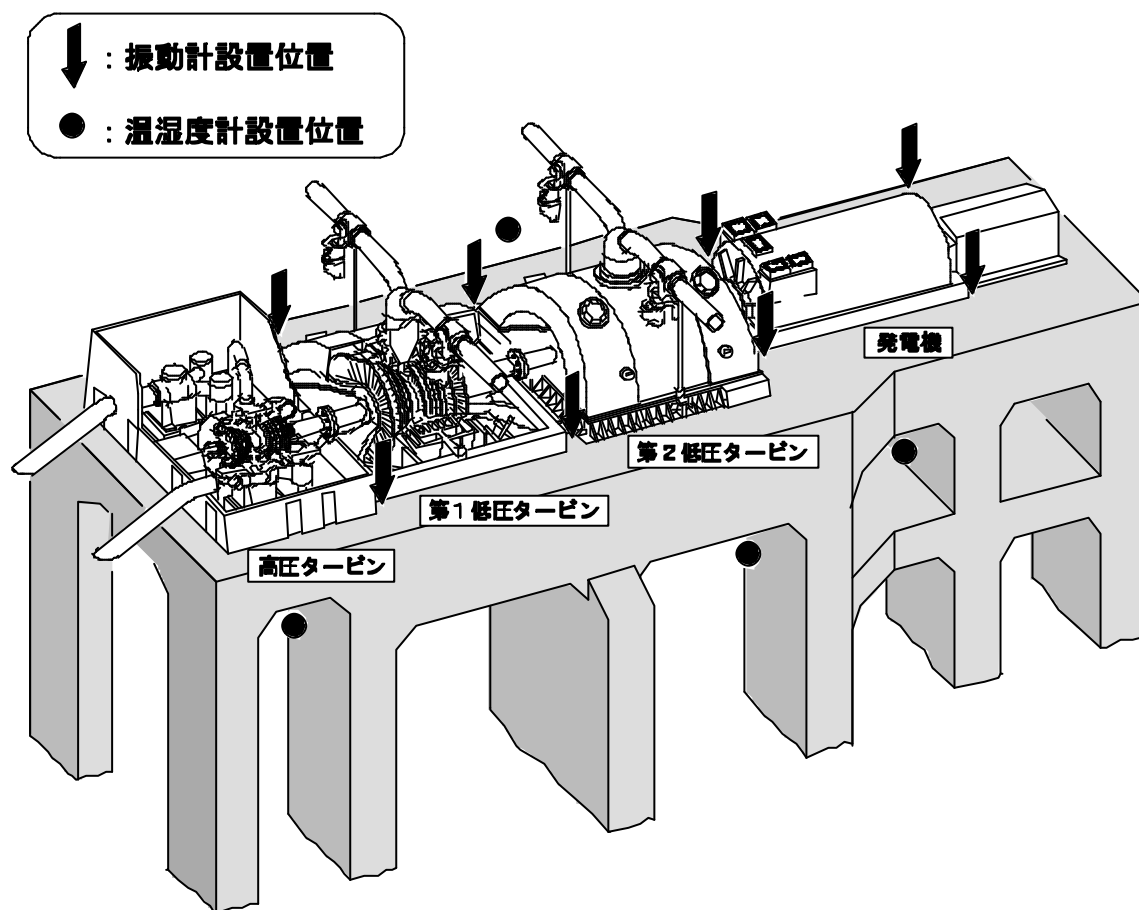


タービン発電機軸方向隙間調整説明図

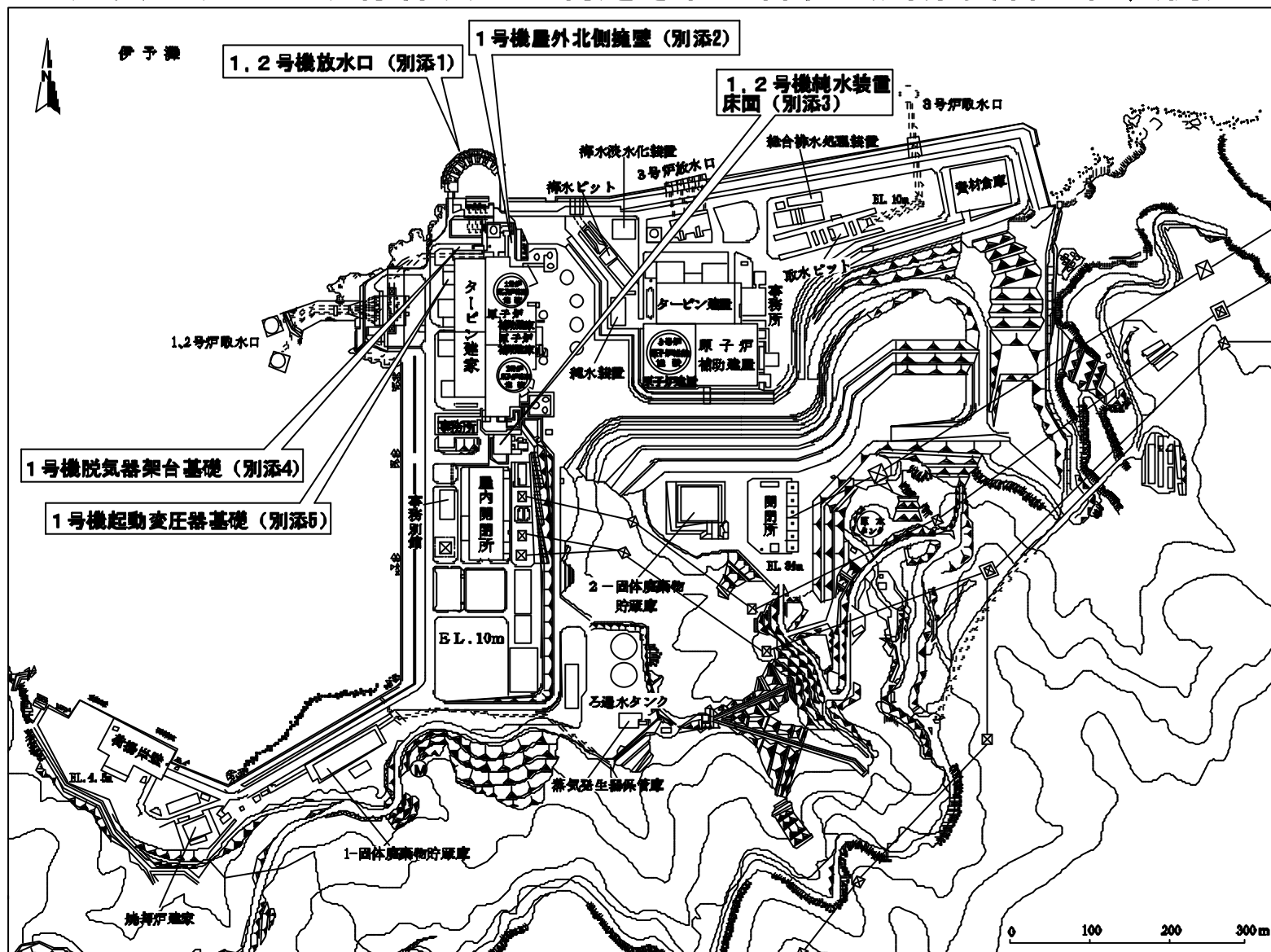
タービン発電機架台振動測定装置等設置位置図

「装置概要」

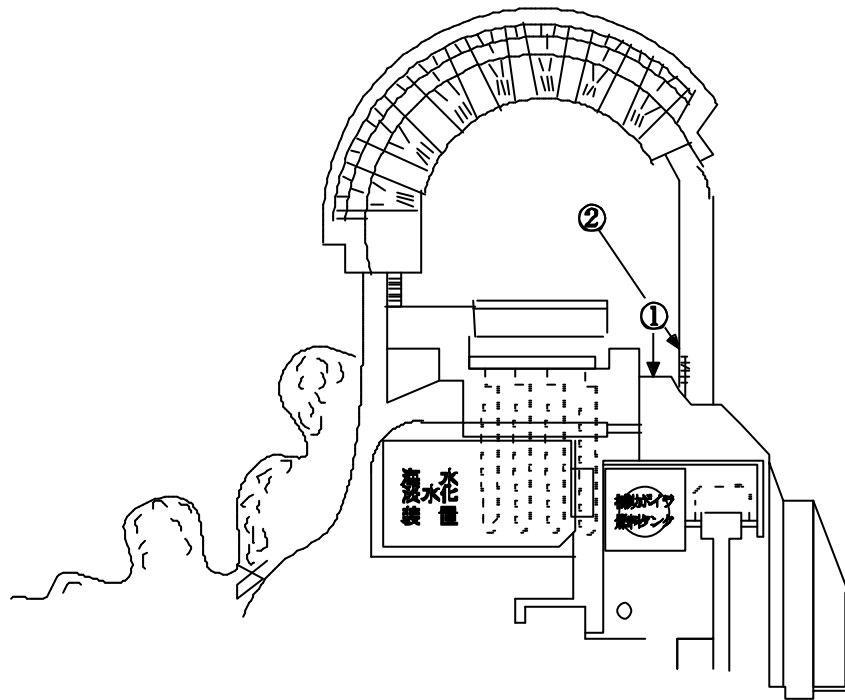
- 振動計：高圧タービン～発電機間に8箇所程度設置する。
- 温湿度計：タービン発電機架台周辺に4箇所程度設置する。



過去にアルカリ骨材反応と判定された部位（別添資料は代表例）



1, 2号機 放水口壁面 (1 / 2)



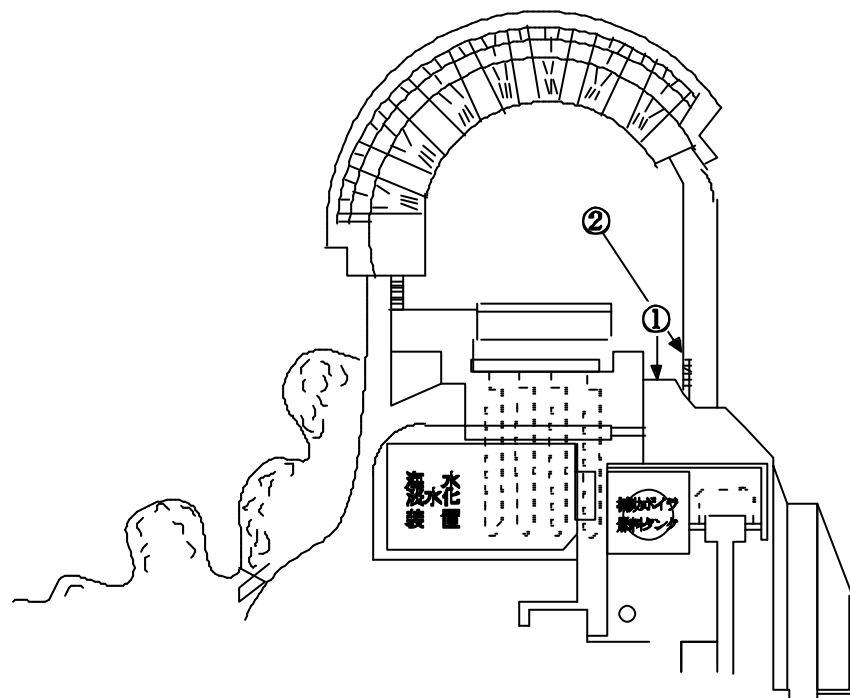
写真① (平成4年の状況)



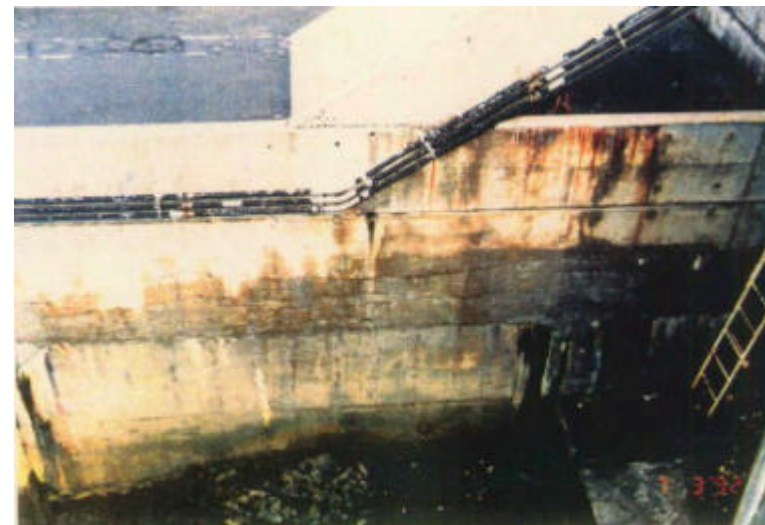
写真① (今回の状況)



1, 2号機 放水口壁面 (2 / 2)



写真② (平成4年の状況)



写真② (今回の状況)

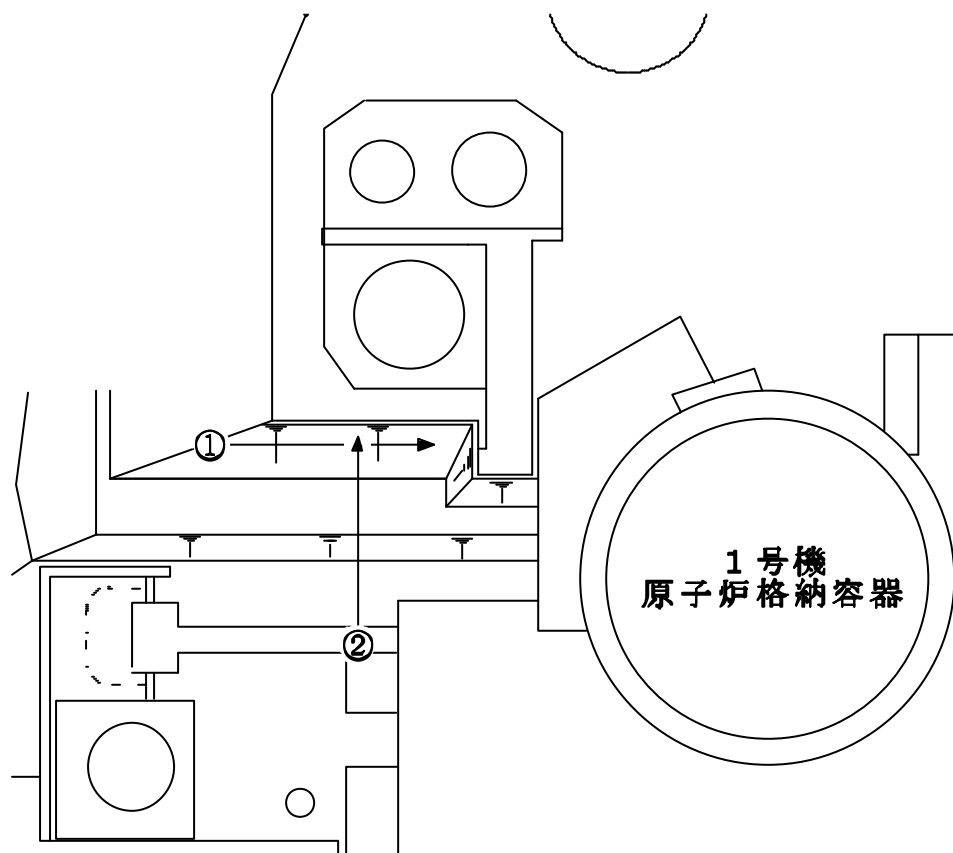


1号機 屋外北側擁壁（1／2）

写真①（平成4年の状況）



写真①（今回の状況）

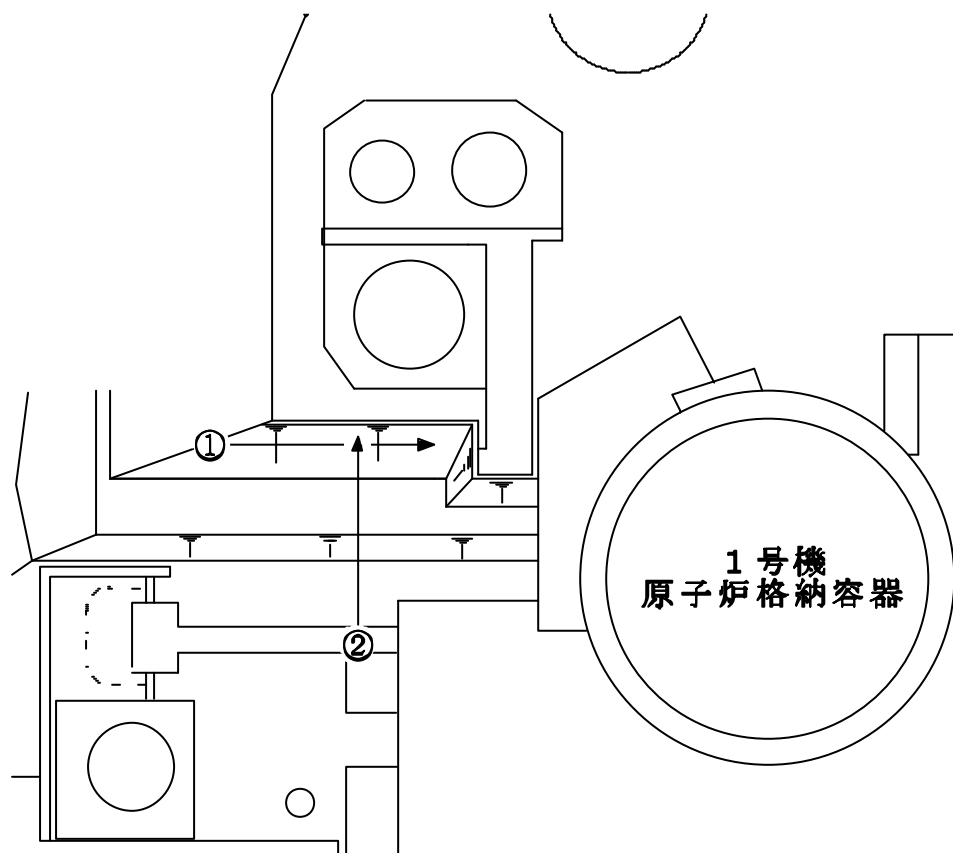


1号機 屋外北側擁壁（2／2）

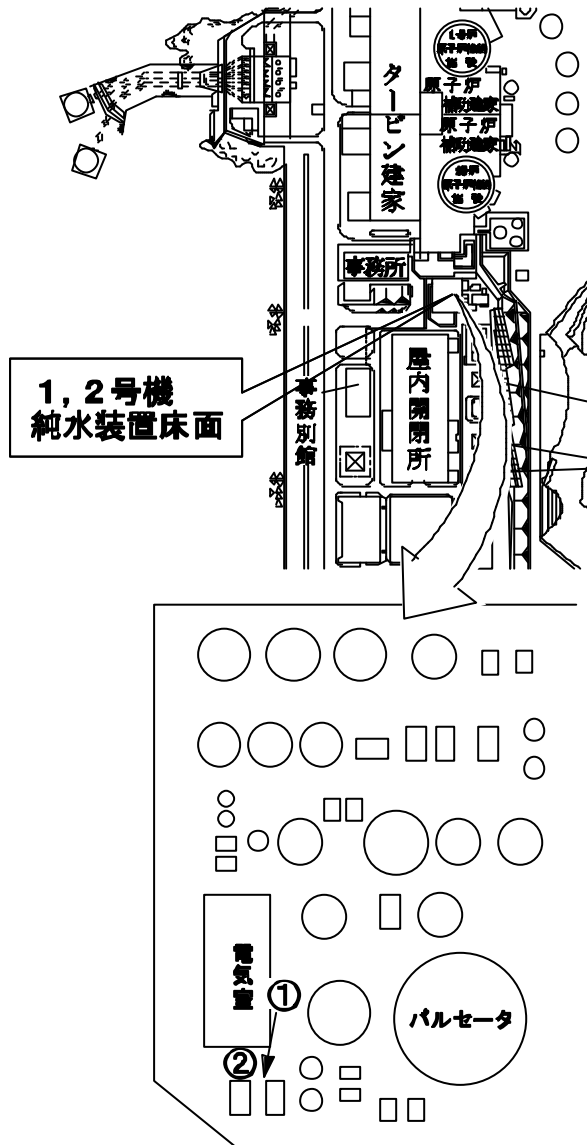
写真②（平成4年の状況）



写真②（今回の状況）



1, 2号機 純水装置床面（1／2）



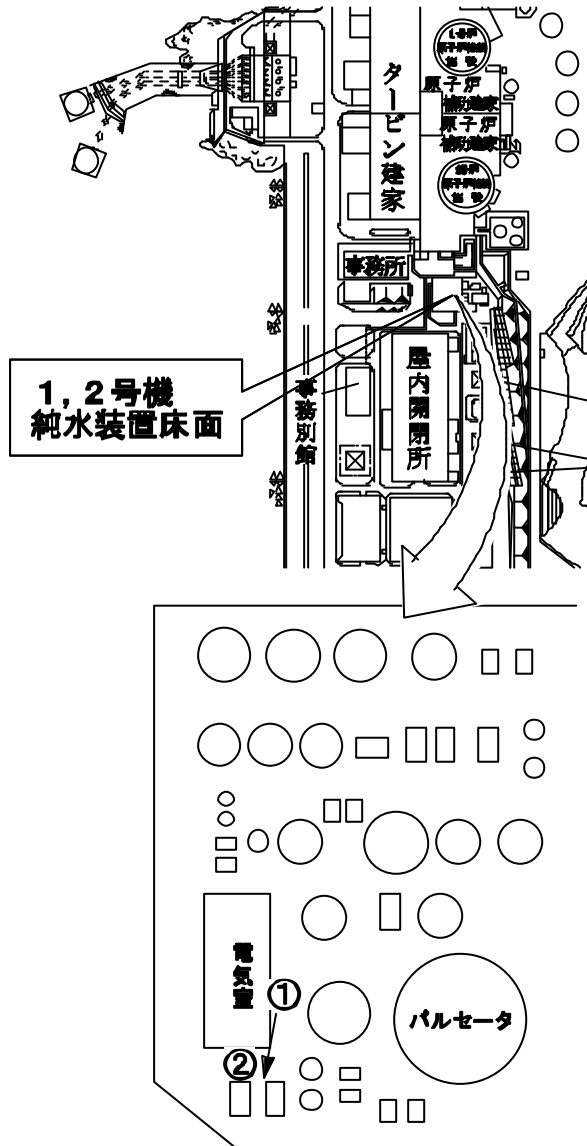
写真①（平成4年の状況）



写真①（今回の状況）



1, 2号機 純水装置床面（2／2）



写真②（平成4年の状況）



写真②（今回の状況）

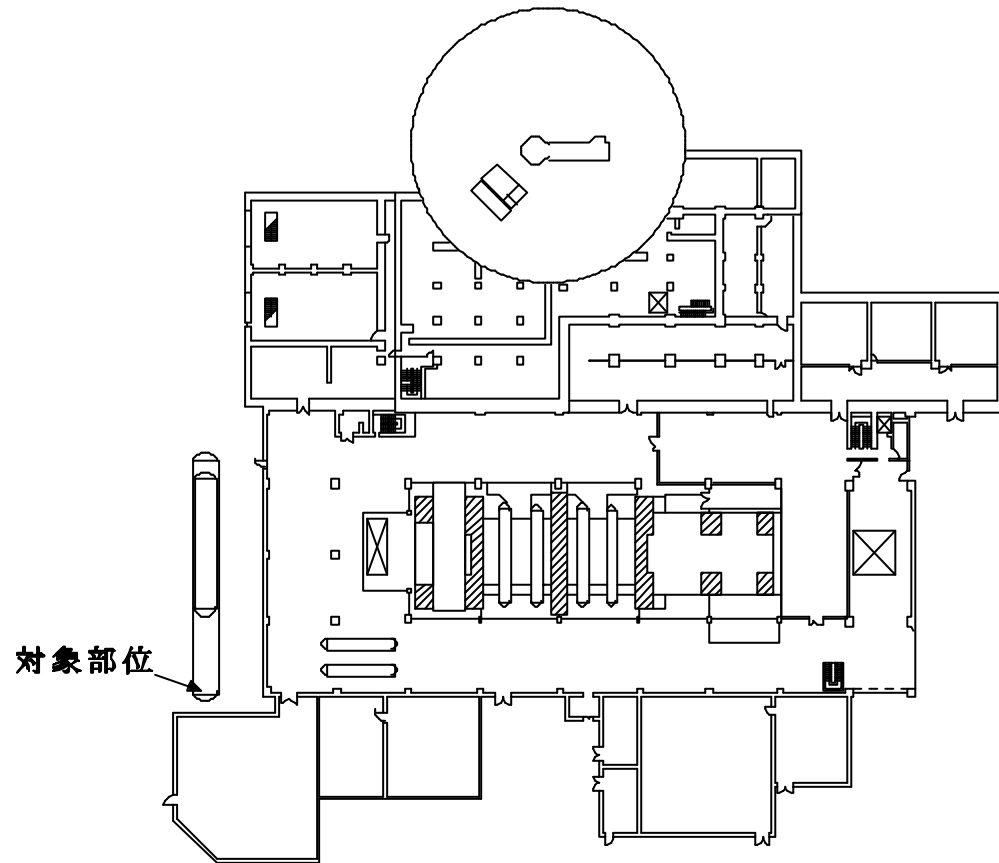


1号機 脱気器架台基礎

平成12年の状況



今回の状況

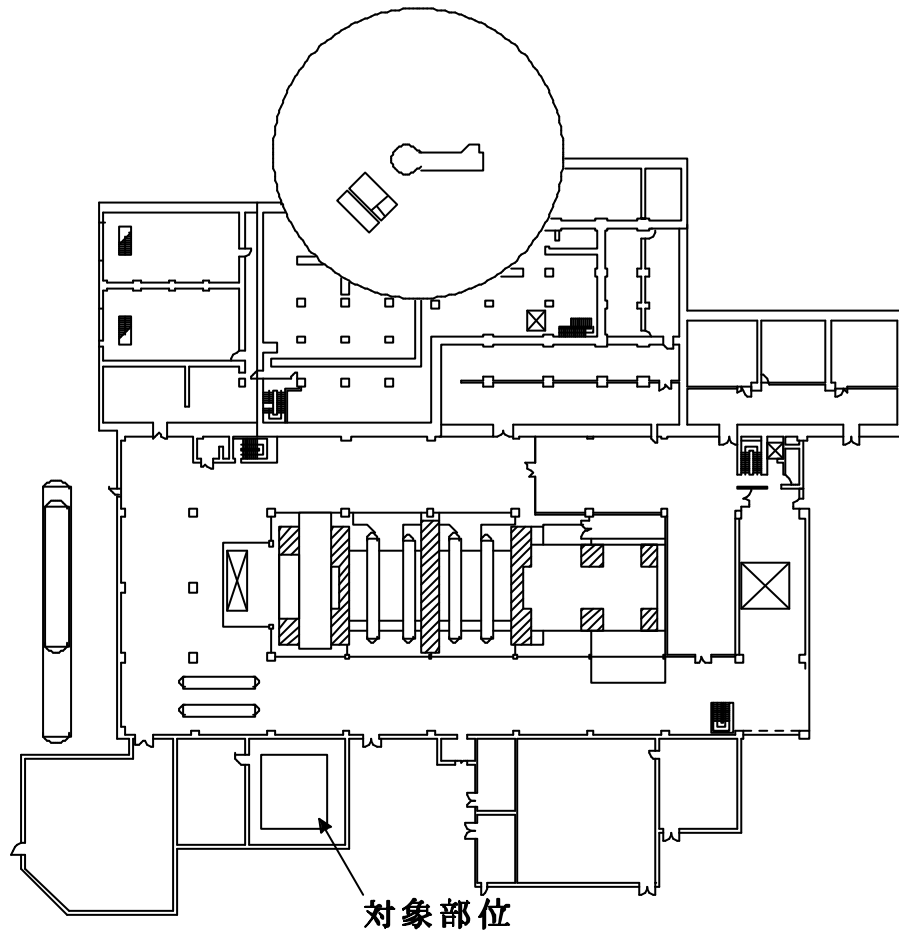


1号機 起動変圧器基礎

平成12年の状況



今回の状況



伊予灘

1号機タービン建家
EL 17m床 (別添1)

D護岸 (別添2)

1,2号炉取水口

平ばえ台擁壁 (別添3)

1,2号機総合排水処理装置
油分離槽 (別添4)

A護岸 (別添5)

防波堤 (別添9)

B護岸 (別添8)

1-固体廃棄物貯蔵庫
擁壁 (別添7)

1-固体廃棄物貯蔵庫

2-固体廃棄物貯蔵庫

ろ過水タンク

蒸気発生器保管庫

原子炉建家

タービン建家

原子炉補助建家

海水ポンプ

海水ポンプ化装置

3号炉取水口

総合排水処理装置

海水ポンプ

燃料倉庫

EL 10m

EL 9m

EL 4m

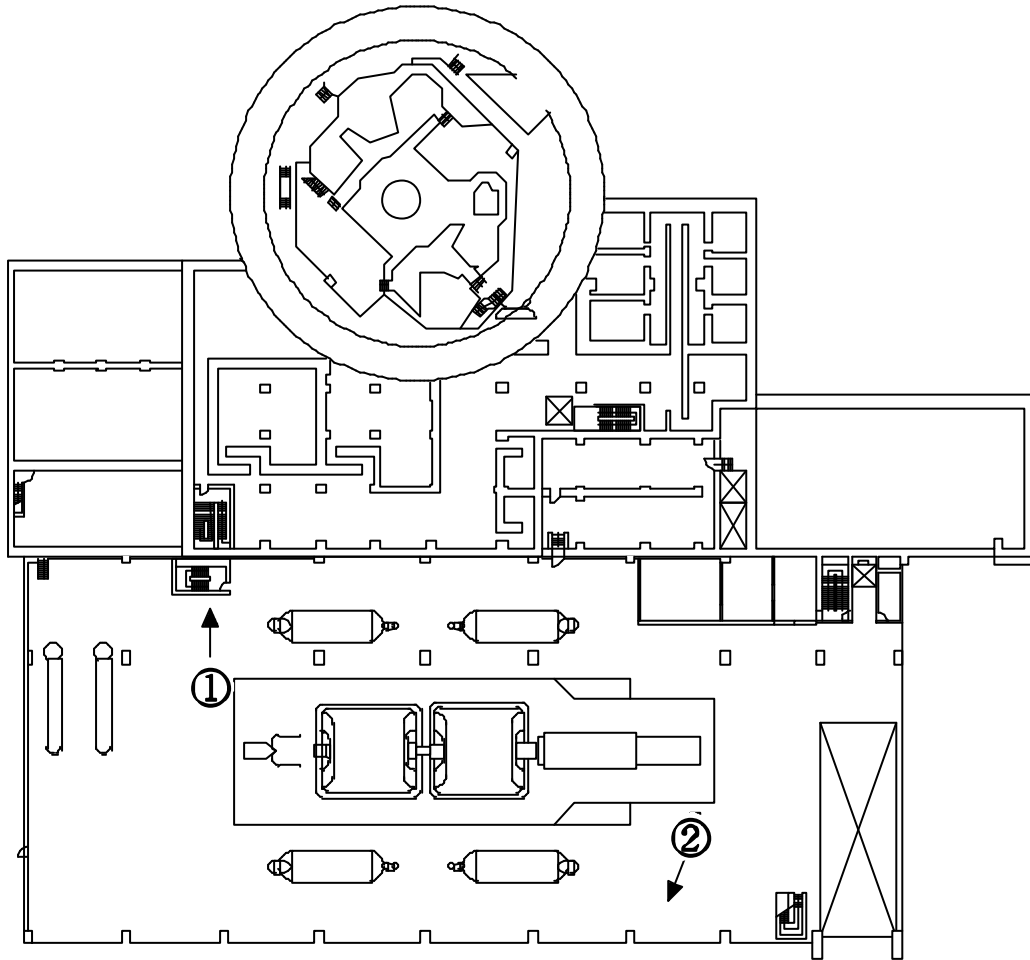
0 100 200 300m

1号機 タービン建家床面

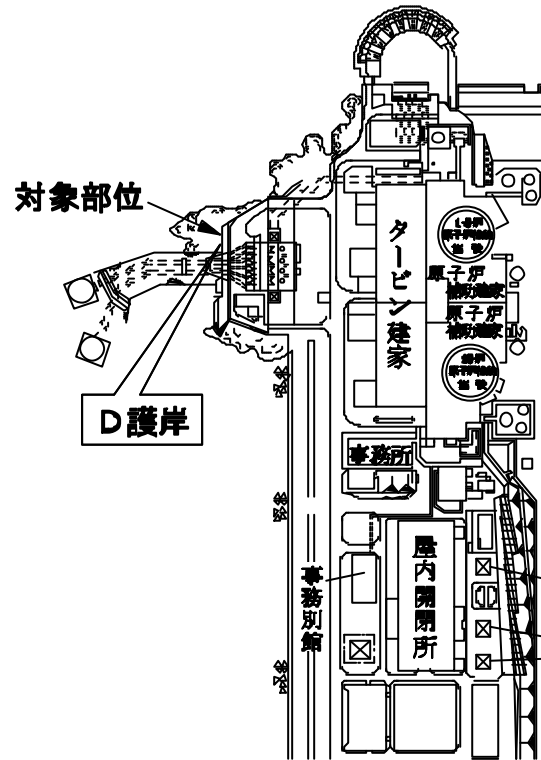
写真①



写真②



1, 2号機 D護岸

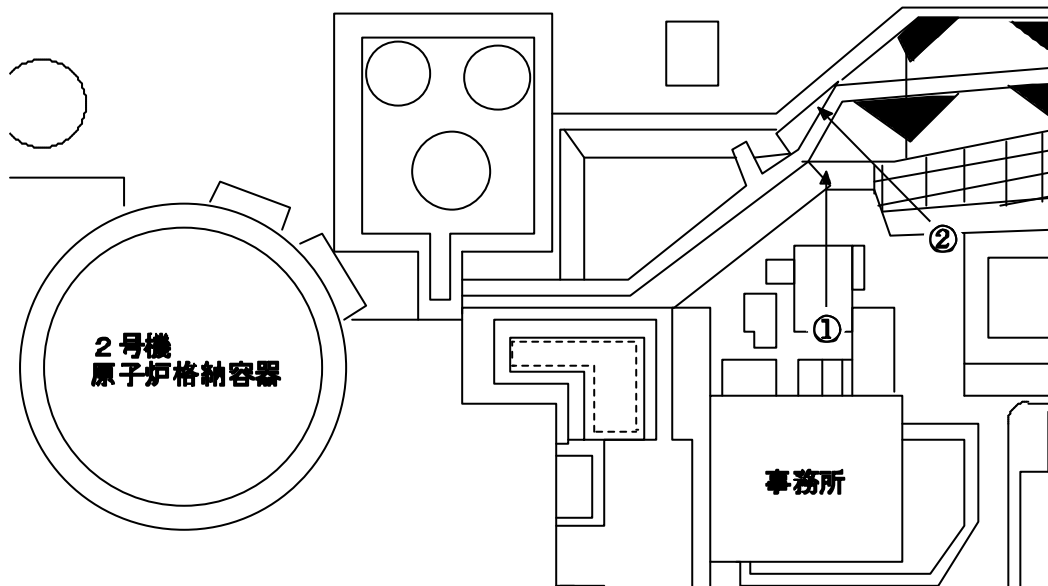
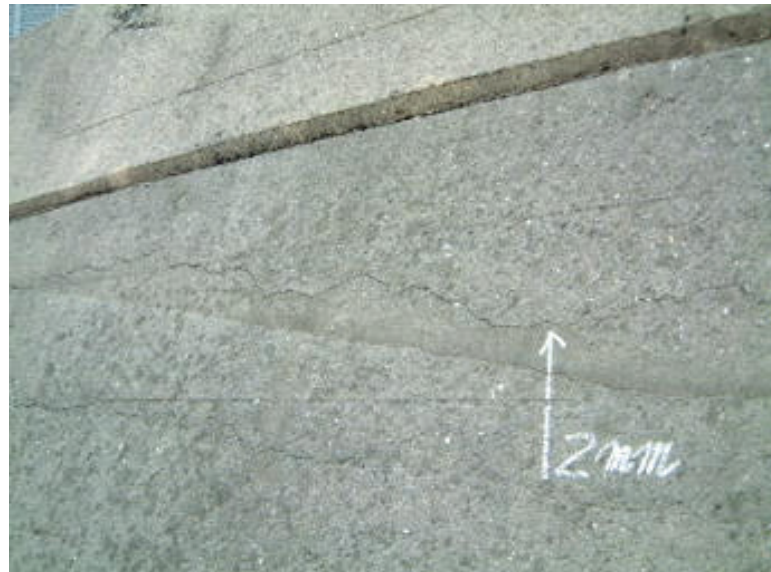


平ばえ台擁壁

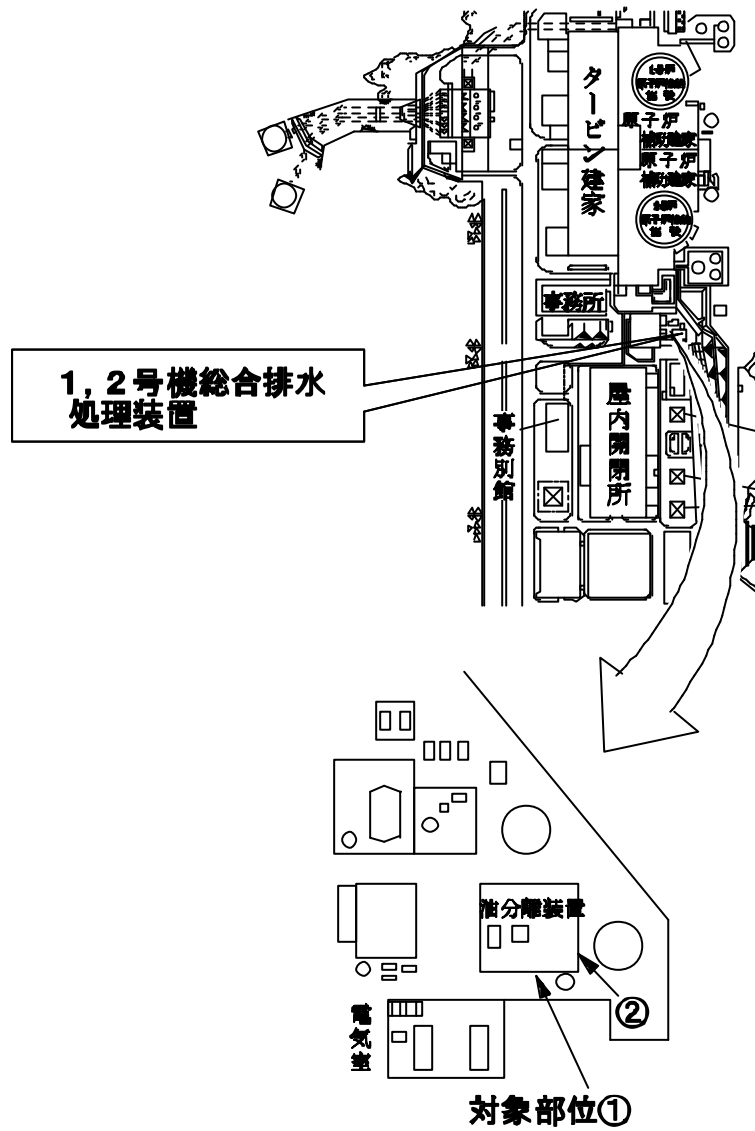
写真①



写真②



1, 2号機 総合排水処理装置油分離槽



写真①



写真②

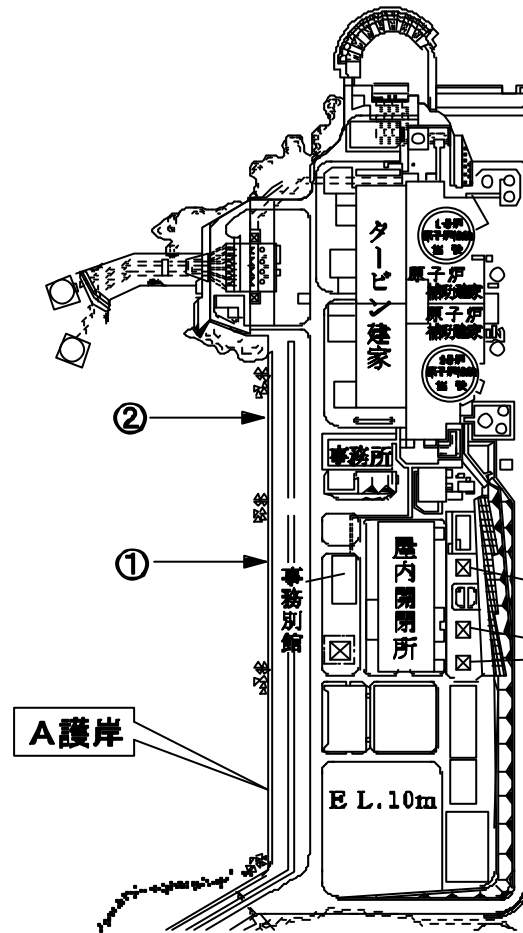


1, 2号機 A護岸

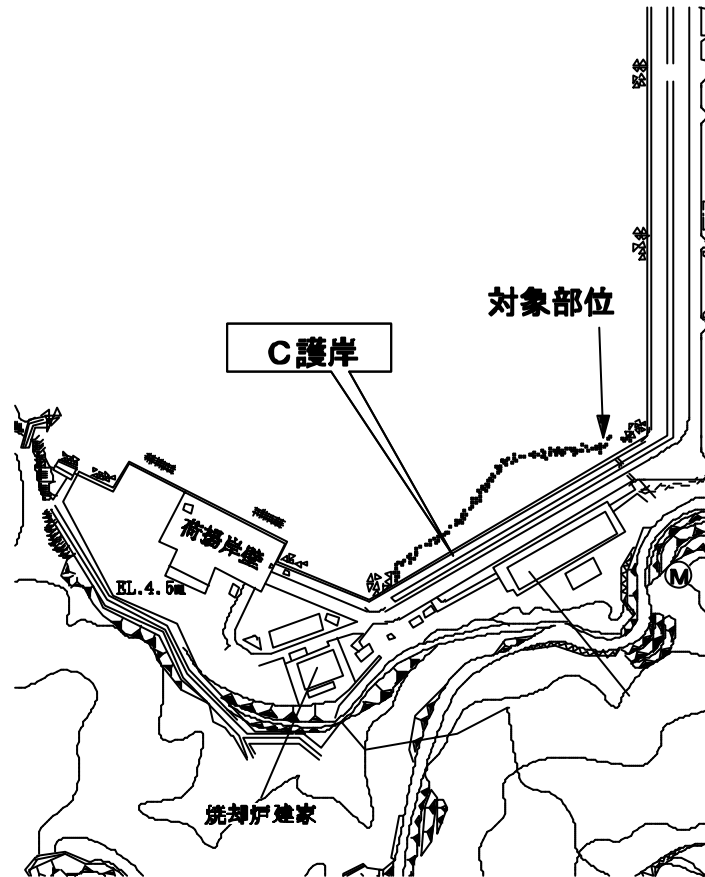
写真①



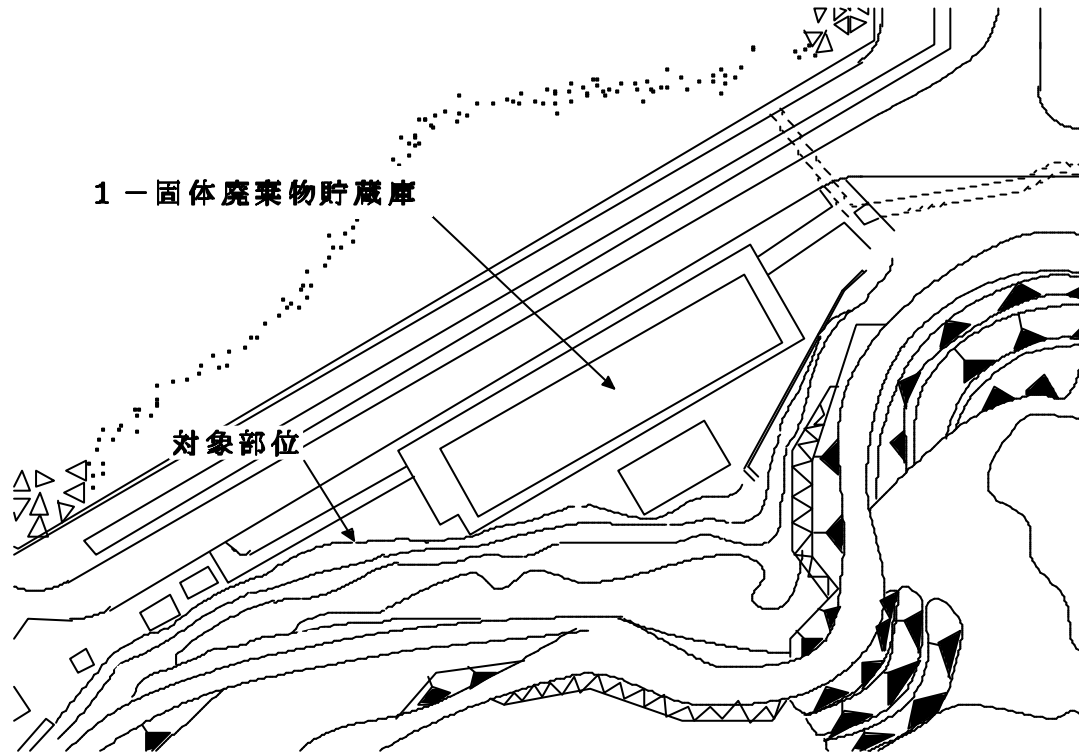
写真②



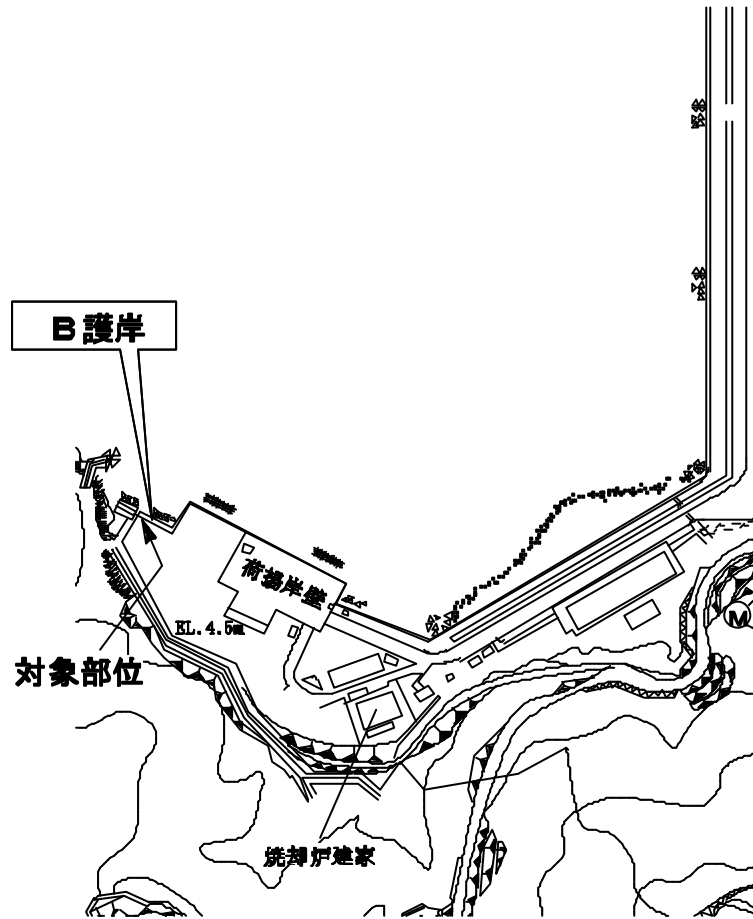
1, 2号機 C護岸



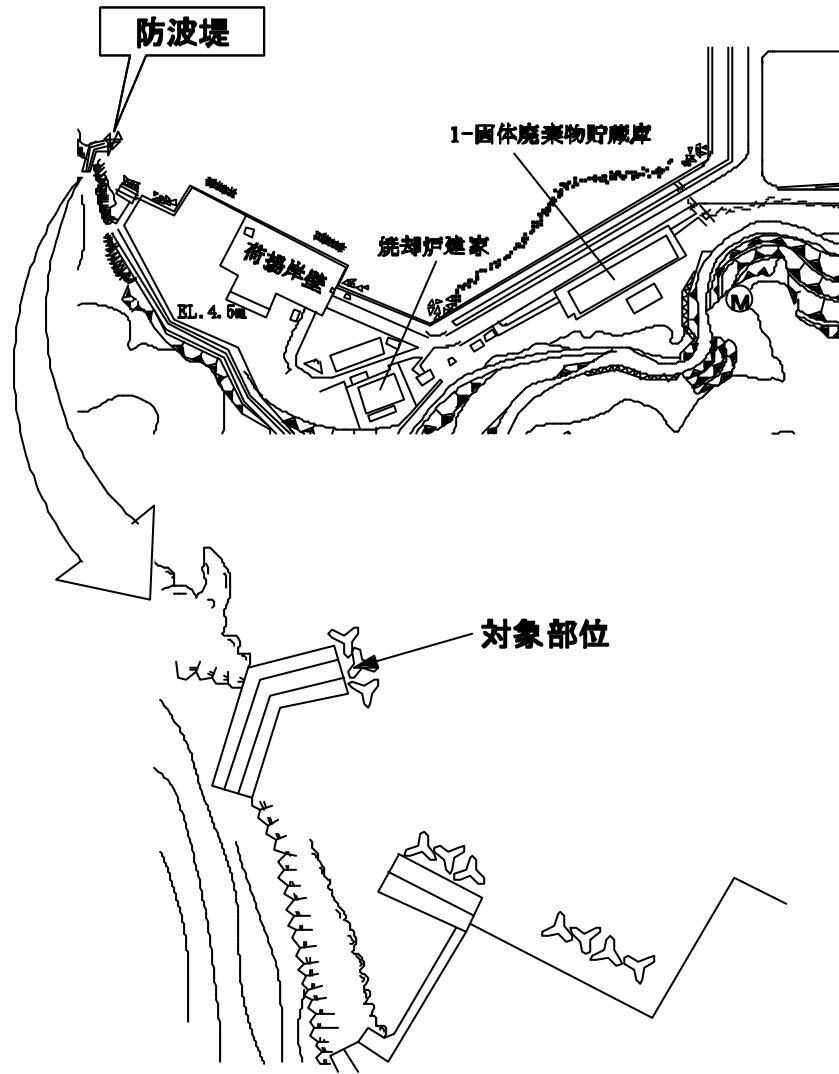
1－固体廃棄物貯蔵庫擁壁



1, 2号機 B護岸



防波堤



そ の 他 の ひ び 割 れ の 状 況

部 位		状 況
1号機	原子炉格納容器内	局所的に壁、床面に軽微なひび割れ
1号機	外部遮へいコンクリート壁	局所的に壁、床面に軽微なひび割れ
1号機	原子炉補助建家	局所的に壁、床面に軽微なひび割れ
1号機	タービン建家	壁、床面に軽微なひび割れ
2号機	原子炉格納容器内	局所的に壁、床面に軽微なひび割れ
2号機	外部遮へいコンクリート壁	局所的に壁、床面に軽微なひび割れ
2号機	原子炉補助建家	局所的に壁、床面に軽微なひび割れ
2号機	タービン建家	建 家 壁、床面に軽微なひび割れ
		タービン架台 局所的に軽微なひび割れ
3号機	原子炉格納容器内	局所的に壁、床面に軽微なひび割れ
3号機	外部遮へいコンクリート壁	局所的に壁、床面に軽微なひび割れ
3号機	原子炉建家	局所的に壁面に軽微なひび割れ
3号機	原子炉補助建家	局所的に壁、床面に軽微なひび割れ
3号機	タービン建家	建 家 局所的に壁、床面に軽微なひび割れ
		タービン架台 柱、梁側面に軽微なひび割れ
1，2号機	屋内開閉所	局所的に壁、床面に軽微なひび割れ
1，2号機	海水淡水化装置建家	局所的に壁、床面にひび割れ
3号機	純水装置建家	局所的に壁、床面にひび割れ
その他の建家		局所的に壁、床面にひび割れ

そ の 他 の ひ び 割 れ の 状 況

部 位	状 況
１，２号機取水ピット	壁面に縦方向のひび割れが点在
１，２号機海水管ダクト	局所的にひび割れ
１，２号機タンク基礎	ひび割れが点在
１，２号機擁壁	ひび割れが点在
１，２号機非常用Ｄ／Ｇ配管ダクト	局所的にひび割れ
１，２号機ケーブルダクト	ひび割れが点在
３号機取水ピット	局所的に壁面にひび割れ
３号機海水管ダクト	局所的にひび割れ
３号機海水ピット	局所的に壁面にひび割れ
３号機放水ピット	局所的に天端及び側壁にひび割れ
３号機タンク基礎	ひび割れが点在
３号機擁壁	ひび割れが点在
３号機護岸	ひび割れが点在
３号機ケーブルダクト	ジョイント部にひび割れ
３号機開閉所基礎	局所的にひび割れ
３号機沈殿池	局所的にひび割れ
荷揚岸壁	目地部に亀裂
道路側溝	ひび割れが点在