

福島第一原子力発電所に来襲した津波の敷地到達時刻について

1. 概要

これまで、当社『福島原子力事故調査報告書』では、津波第1波襲来を3月11日15:27頃、津波第2波襲来を15:35頃としてきた。この時刻は、福島第一原子力発電所敷地より約1.3km沖合いにある波高計に到達した時刻である。しかし、波高計の内蔵時計に時刻補正機能はなく不正確な可能性があったため、津波が福島第一原子力発電所敷地へ到達した時刻が正確に把握できていなかった。

今回、福島第一原子力発電所事故時における敷地への津波到達時刻を分析・評価するにあたり、下記的手段により分析・評価を実施した。

分析Ⅰ：波高計の内蔵時計の精度について分析

分析Ⅱ：撮影された連続写真から、津波が来襲した時刻を分析（上記の波高計で記録された津波の時刻歴波形を活用し、カメラの内蔵時計を補正する）

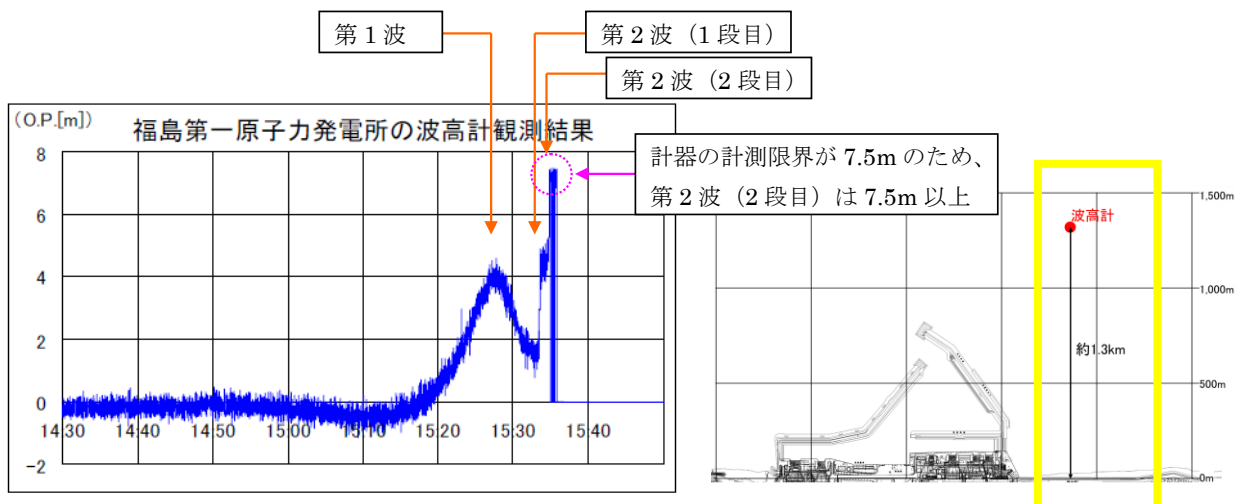
分析Ⅲ：プラントデータから、敷地に到達した津波の時刻を分析

但し、上記分析は秒単位の確からしさを説明するものではない。

上記分析Ⅰ・Ⅱ・Ⅲより、福島第一原子力発電所の敷地に来襲した津波（第2波）の到達は、15時36分台との結論に至った。

2. 用語の定義

波高計記録および写真を詳細に分析するにあたり、福島第一原子力発電所に来襲した津波を、下図のとおり定義する。



波高計観測記録及び福島第一原子力発電所敷地と波高計の位置関係

3. 分析の考え方

福島第一原子力発電所敷地への津波到達時刻の分析にあたって以下の考え方で実施する。

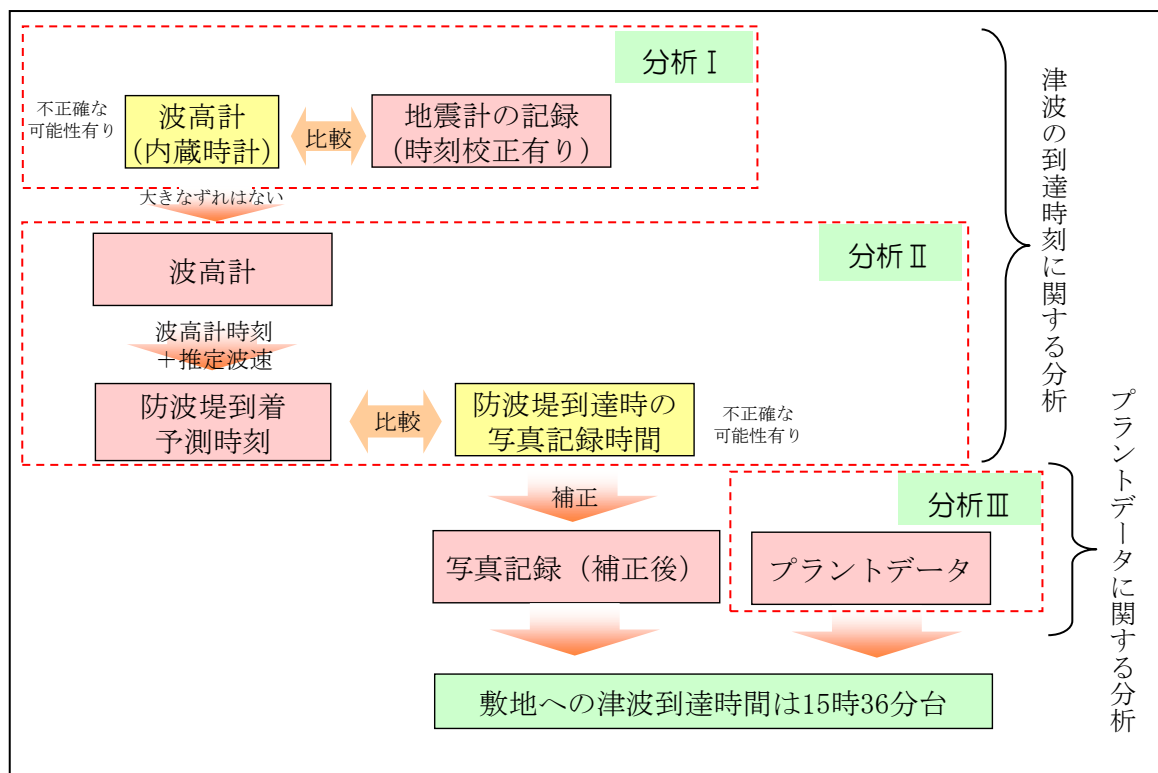
分析Ⅰ・Ⅱについては、「波高計及び写真を活用した分析」として、分析Ⅲについては、「プラントデータに関する分析」として後述する。

分析Ⅰでは、これまで時刻に不正確さが残っていた波高計の内蔵時計の精度について分析を行う。比較対象として、毎時時刻の校正がされている福島第一原子力発電所各号機の地震計を基準とし、波高計で記録された水圧波を比較し、時刻のずれを分析する。

分析Ⅱでは、分析Ⅰの結果から得られた波高計の時刻を元にして、波高計を通過した時刻と津波推定波速を用い、南防波堤屈曲部への到達時刻を予測する。

南防波堤屈曲部に津波の第2波（第1段）が到達している写真があることから、カメラの内蔵時刻と上記で予測した津波到達時刻を比較し、撮影された連続写真の時刻を補正する。

分析Ⅲでは、これまで得られているプラントデータ（海水ポンプ・電源盤・ディーゼル発電機の機能喪失時間）を活用し津波到達時間を推定する



敷地への津波到達時間の分析にあたっての考え

4. 波高計及び写真を活用した分析（分析Ⅰ・Ⅱ）

4. 1. 目的

平成 23 年 3 月 11 日に、福島第一原子力発電所の沖合約 **1.3km** にある波高計で記録された津波の時刻歴波形および陸域において撮影された連続写真から、津波が来襲した時刻を分析する。

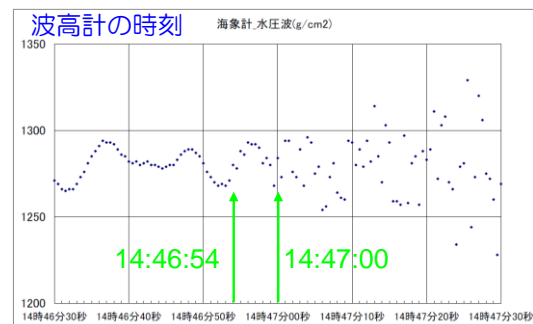
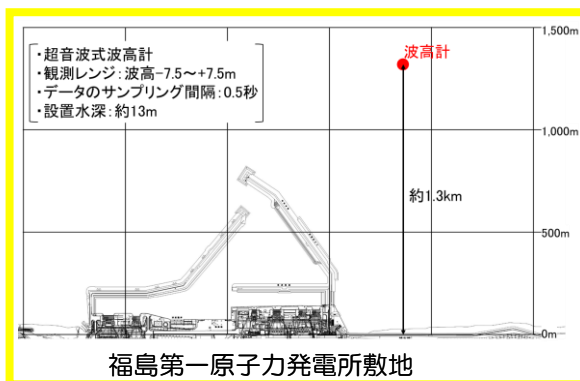
4. 2. 波高計の内蔵時計の分析（分析Ⅰ）

各号機の地震計の初期微動と波高計に採用している水圧波（地震動で反応）を比較し時刻の精度を検証する。

波高計のグラフに擾乱が見られるため、地震動の影響と考えられる。つまり地震動が到達したのは、波高計の内蔵時計で 14 時 46 分 54 秒から 47 分 00 秒の間と判断される。

一方、各号機に設置された地震計（毎時時刻校正を実施）によると地震の記録開始が 14 時 46 分 48 秒～52 秒である。地震動の伝播は毎秒数 km 以上と考えられるため、波高計と発電所の計測位置の差である **1.3 km** はほとんど無視できる。

以上のことから、波高計の内蔵時計の精度は、地震計の記録開始時刻の中央値である 14 時 46 分 50 秒と比べると 4～10 秒程度の進みと考えられ、波高計の時刻に大きなずれはないものとして扱えると考えられる。



各号機の地震計の初期微動の観測時間
14時46分48秒～14時46分52秒

比較

地震動の影響による乱れ
14時46分54秒～14時47分00秒

4. 3. 写真の分析（分析Ⅱ）

（1）連続写真の撮影状況

分析に用いる連続写真は合計 44 枚あり、そのうち 1 枚目から 27 枚目までは、廃棄物集中処理建屋の中央操作室（以下、中操という）の北側の窓から撮影されたものである。中操の窓から海側方向をみると、4 号機タービン建屋と窓の右端に視野を遮られるため、添付図に示すとおり、南防波堤はほぼ全てを確認することはできるが、北防波堤は先端付近のみ、東波除堤は 2 号機前面から南部分のみ確認することがきる。

次に、時刻については、写真のプロパティ情報から、デジタルカメラの内蔵時計による撮影時刻を得ることができるが、後述するとおり内蔵時計の時刻は正確ではないことから、(2)以降では 1 枚目撮影時刻から数えた経過時間（分：秒）を示すこととする。

なお、連続写真の位置関係については、【参考 1】に、連続写真全 44 枚は【参考 2】に、整理する。

（2）ゆるやかな水位低下

南防波堤にかかる海水面の状況から、写真 1 から写真 4 の 1 分 26 秒間において、徐々に水位が低下している。また、写真 4 から写真 5 の 3 分 34 秒間においては、明瞭に水位が低下している。

写真 1 を除いたとしても、少なくとも写真 2 から写真 5 の時間帯（4 分 26 秒間かそれ以上）は、港内の水位はゆるやかに低下していたものと判断される。

1 (00:00)

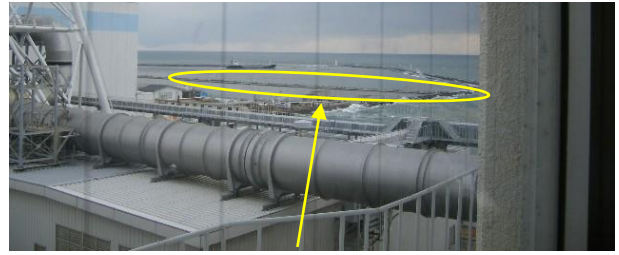
北防波堤

南防波堤



2 (00:34)

東波除堤



3 (01:02)



4 (01:26)



5 (05:00)



(3) 段波の確認

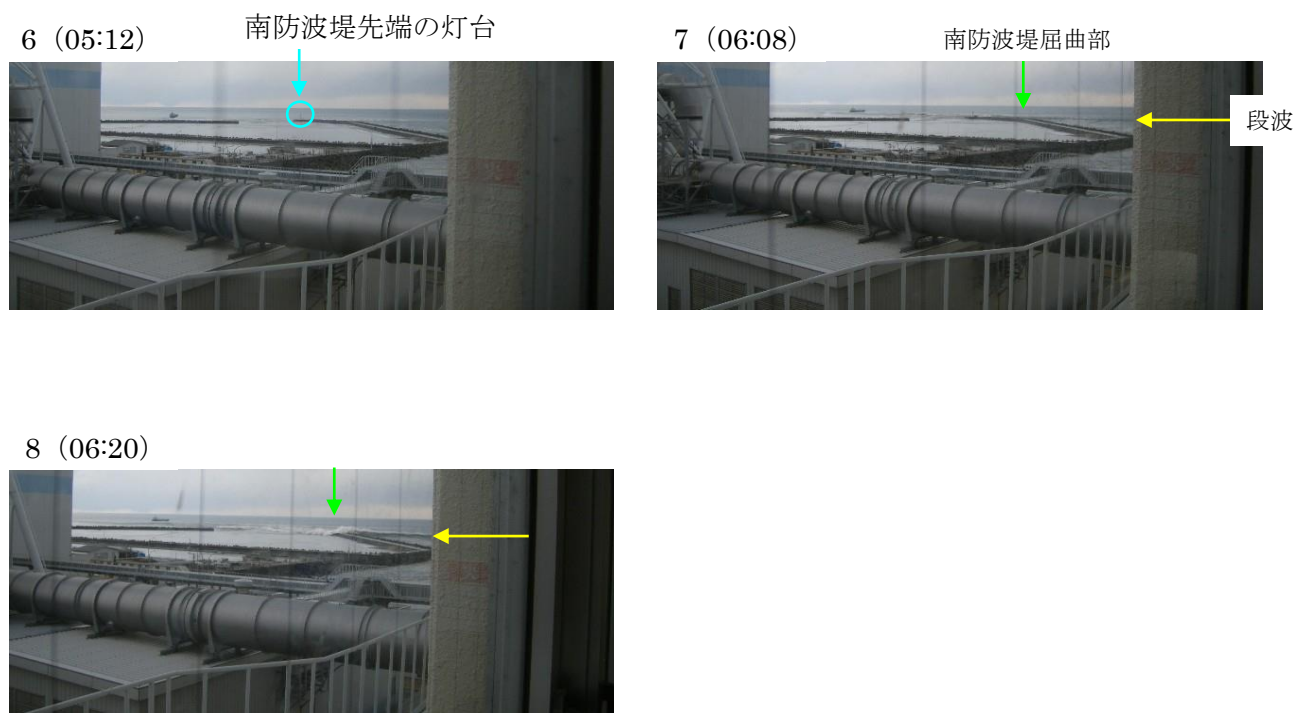
写真 7 では、段波状の津波が明瞭に確認できる。この段階では、段波は南防波堤本体ならびに南防波堤先端の灯台に到達していないことから、段波の位置は港外である。

写真 8 では、段波が南防波堤に到達し、南防波堤先端の灯台が津波に隠れていることから、この写真 8 において、段波が南防波堤の屈曲部付近に到達しているものと判断される。

ここで、南防波堤の陸寄りの付け根部分や東波除堤の露出状況に着目すると、写真 5 の露出状況と、写真 6～8 の露出状況は、ほぼ同程度である。このため、写真 7・8 で確認される数m級の津波段波は、ゆるやかな水位低下の直後に到達したものと判断される。

すなわち、写真 1～5 における水位低下は第 1 波ピーク後の水位低下であり、写真 7・8 の段波は第 2 波（1 段目）と判断される。

なお、写真 5～8 の 1 分 20 秒間に 4 枚の写真が撮影されていることから、第 2 波（1 段目）の到達の見落としはしないものと判断される。



(4) 津波による水柱

写真 9 から写真 12 にかけて、南防波堤に沿って段波、すなわち第 2 波（1 段目）が進行する様子が確認できる。

写真 11 では、南防波堤の付け根付近は津波に覆われている一方で、東波除堤には段波が到達した様子が認められない。このため、茶色い水柱は、港内から（東から）の津波ではなく、南東側から 4 号機前面に浸入してきた津波によるものと判断されるが、4m 盤に遡上したのち構造物に衝突して上方へ上がったのか、あるいは放水路を通じて開口部から吹き上げたのかについては、この写真だけでは判断できない。なお、場所については、4 号機前面の 10m 盤にある小屋のすぐ北東側で水柱が上がっていることから、4m 盤と 10m 盤の境界付近で水柱が形成されているものと判断される。

写真 11、写真 12 では、沖合に第 2 波（2 段目）と推定される波が認められることから、写真 11 の水柱は、写真 6～写真 8 で確認される数 m 級の第 2 波（1 段目）が、4m 盤と 10m 盤の境界付近に到達した際に生じたものと判断される。

第 2 波（1 段目）の到達を示す写真 8 から写真 12 までは 48 秒間であり、その間の現象に見落としではなく、水柱は第 2 波（1 段目）が原因で発生したものと判断される。

9 (06:36)



東波除堤

10 (06:42)



第 2 波
(1 段目)

11 (07:04)



12 (07:08)



第 2 波
(2 段目)

(5) 最大波（第2波（2段目））の港湾への到達

水柱が上がった写真11の20秒後である写真13において、10m盤の浸水が認められる。

写真13の6秒後である写真14の右上には東波除堤と考えられる構造物が見えており（A）、この時点は写真7・8で確認される数m級の第2波（1段目）が到達した前後と考えられる。また、写真15、写真16では、排気筒の付け根部分が見えており（B）、写真17、写真18にあるような大規模な津波の遡上は認められない。これらのことから、写真13～写真16において、10m級の第2波（2段目）は未だ10m盤には到達しておらず、写真13、写真14に認められる10m盤への遡上は、第2波（1段目）による限定的な遡上と判断される。

写真14の12秒後に撮影された写真15では、南防波堤および北防波堤を覆う津波が到達している。写真15の14秒後に撮影された写真16では、南防波堤および北防波堤に加えて、東波除堤も津波に覆われるとともに、港内に大きな段波が認められる。

写真14より以前の写真では、いずれも、防波堤や波除堤が確認できていたが、写真15、写真16で初めて港湾が津波に覆い尽くされている。このことから、写真15、写真16で港内に認められる津波が、10m級の第2波（2段目）であると判断される。ただし、写真15、写真16では、排気筒の付け根部分が見えていることから、第2波（2段目）は未だ10m盤には到達していないものと判断される。

13 (07:24)



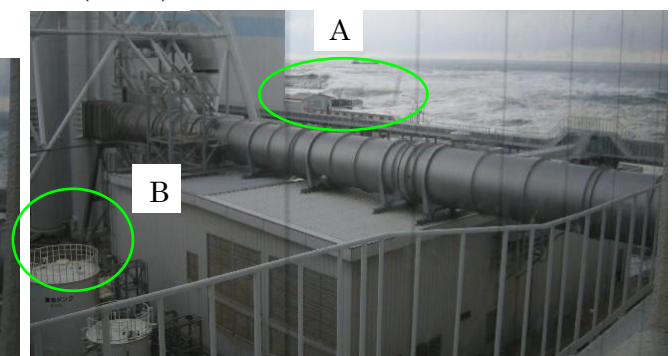
14 (07:30)



15 (07:42)



16 (07:56)



(6) 最大波（第2波（2段目））の10m盤への到達

写真16の14秒後に撮影された写真17では、10m盤上に大量かつ急激な海水の流れ込みが認められ、写真18、写真19と続く。写真17では、港湾側の様子は判然としない。写真18、写真19では津波により上昇した海面が確認できるが、ここに防波堤・波除堤は認められないことから、第2波（1段目）とは異なり、防波堤・波除堤を全面的に覆う津波が来襲していることが判る。

写真18は、港内に巨大な津波が押し寄せた写真16から、24秒後である。また、写真18、写真19では、写真15、写真16までは写っていた10m盤の電気品室がほぼ水没している。この電気品室の高さは5.15mであることから、写真18、写真19の津波は0.P.+15m程度の高さと考えられる。

以上のことから、写真18の前後には、福島第一原子力発電所の全ての原子炉建屋付近に、高さ0.P.+15m程度の津波第2波（2段目）が到達していたものと判断される。

また、写真に映る軽油タンク壁面ならびに電気品室における津波水位の時系列をまとめたグラフを見ると、写真13～写真16に認められる津波の遡上は限定的な遡上であり、写真17の直前から急激に津波が押し寄せてきた状況が推定され、写真の分析と調和的である。

17 (08:10)



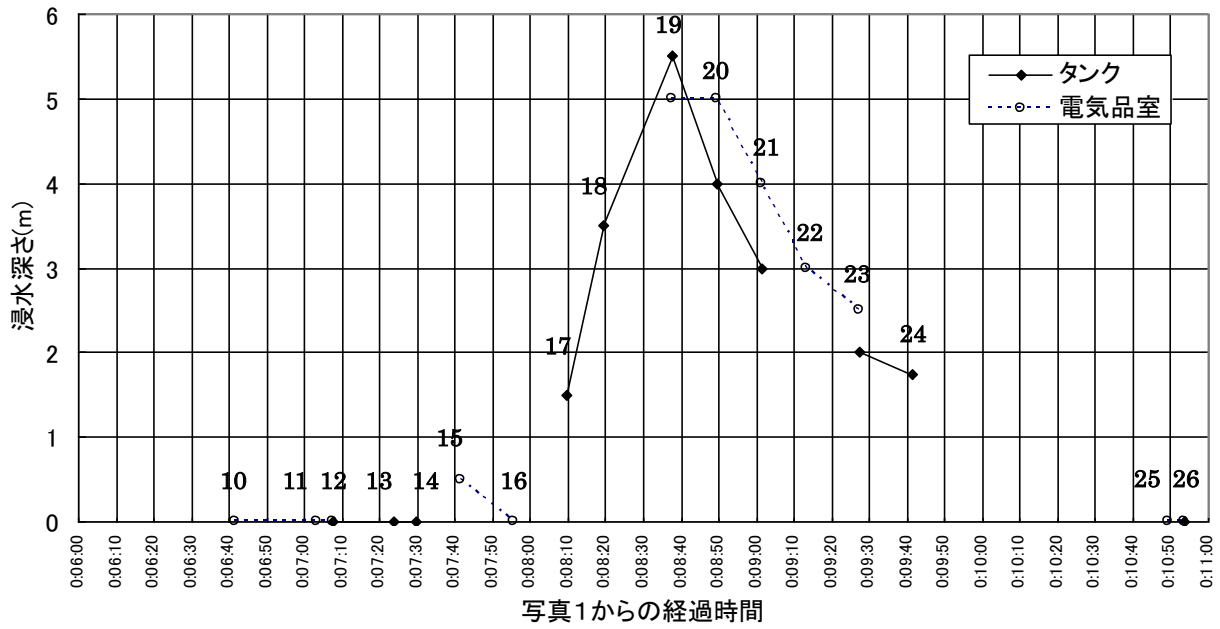
18 (08:20)



19 (08:38)



浸水深さの変化(写真より)



4. 4. 波高計設置位置から南防波堤屈曲部までの所要時間の推定と写真撮影時刻の補正

前述したとおり、写真 8 において、津波の第 2 波（1 段目）の段波が南防波堤屈曲部に到達している事実から、写真 8 の時刻を推定する。手順は次のとおり。

- ① 波高計から南防波堤屈曲部までの距離を読み取り。
- ② 波高計から南防波堤屈曲部までの第 2 波（1 段目）の伝播所要時間を算出。
- ③ 波高計における第 2 波（1 段目）の到達時刻に②の所要時間を加え、写真 8 の時刻を推定。

①波高計から南防波堤先端までの距離

波高計から南防波堤先端までの距離は 900m 程度である。

なお、この距離の取り方が、やや長め、すなわち、所要時間を多めに見積もる取り方となっていることを【参考 3】に整理する。

②波高計から南防波堤までの第 2 波（1 段目）の伝播所要時間

波高計設置位置の水深は約 13m、南防波堤屈曲部の水深は約 6m である。

ここで、津波波速の近似式： $c=(gh)^{1/2}$ と、津波高さにグリーンの法則： $H2/H1 = (h1/h2)^{1/4}$ を適用し、波高計設置位置から港湾付近までの所要時間を以下のとおり推定する。詳細は【参考 4】に整理する。

a. 静水深に基づく推定波速から算出した所要時間

所要時間を長めに評価する観点から、静水深 h による推定を行った。その結果、波高計設置位置から南防波堤屈曲部までの所要時間は約 95 秒と推定された。

b. 全水深に基づく推定波速から算出した所要時間

次に、より実際に近い評価を行うため、津波高さを加算した全水深（＝静水深＋津波高さ）を用いて推定を行った。津波高さは、波高計記録における第 2 波（第 1 段）の平均的な高さである 4.5m とした。その結果、波高計設置位置から南防波堤屈曲部までの所要時間は約 76 秒と推定された。

以上のことから、波高計設置位置から港湾付近までの所要時間は 76～95 秒と推定する。

③写真 8 の時刻の推定

第 2 波（第 1 段）が波高計に到達した時刻は、15 時 33 分 30 秒頃である。

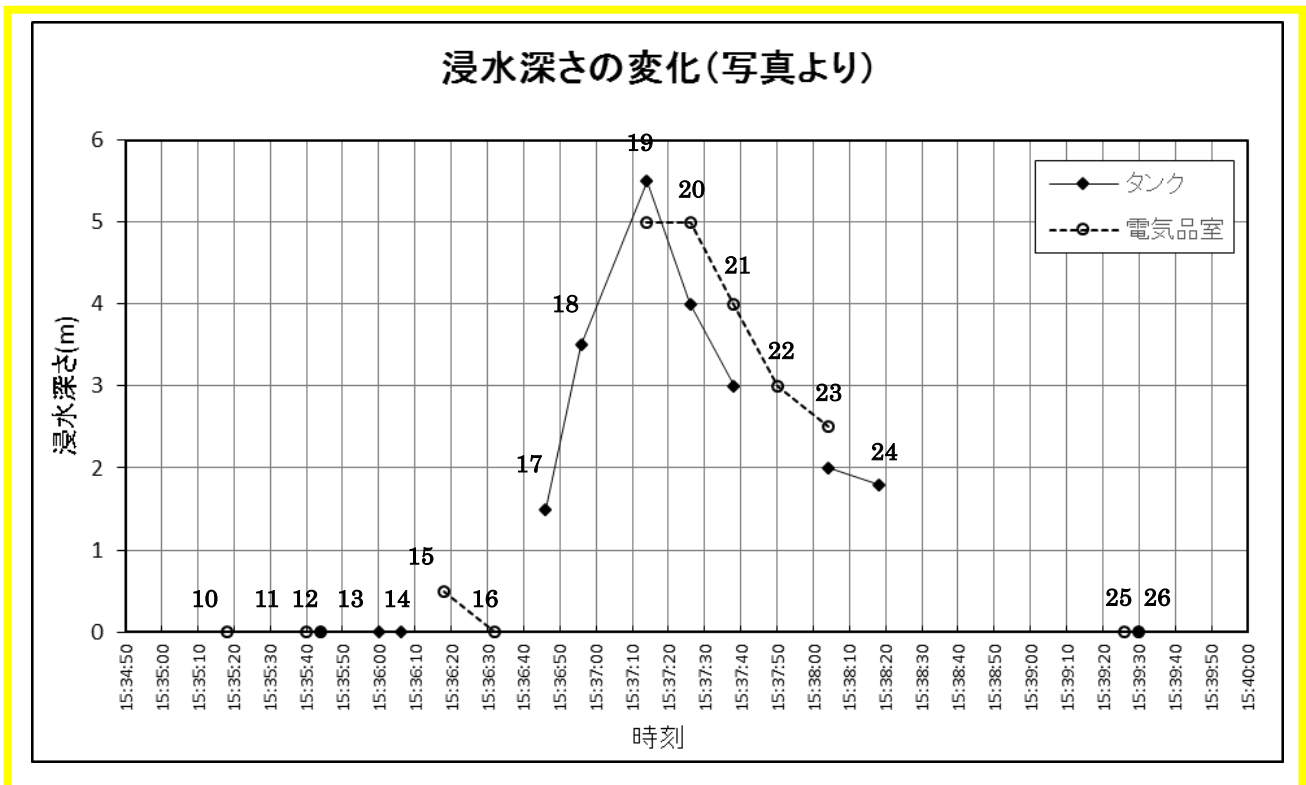
これに推定所要時間を加えると、写真 8 の実際の時刻は 15 時 34 分 46 秒～15 時 35 分 05 秒と推定される。一方、写真 8 のカメラ内蔵時刻は、15 時 41 分 36 秒である。

以上のことから、カメラ内蔵時刻は実際の時間よりも、6 分 31 秒～6 分 50 秒程度進んでいたものと推定される。なお、上述の② a、② b より、6 分 50 秒の方がより実際に近い値と考えられる。

4. 5. まとめ (分析 I・II)

波高計記録および写真を詳細に分析した結果、次のことが判明した。

- ① カメラ内蔵時刻は実際の時間よりも、6分31秒～6分50秒程度進んでいた。なお、6分50秒の方がより実際に近い値と考えられる。
- ② ①の平均(6分40秒)を採用して時刻を補正すると、カメラ内蔵時刻で15時35分16秒の写真1の推定時刻は15時28分36秒頃である。
- ③ 同様に時刻を補正すると、第2波(1段目)が南防波堤屈曲部に到達した(写真8)時刻は、15時34分56秒頃であり、10m盤のタンク周辺に小規模に浸水し始めたことが確認できる(写真13)時刻は、15時36分00秒頃である。
- ④ 10m盤のタンク周辺における遡上が、いったん収まった(写真15、写真16)時刻は、15時36分18秒頃から15時36分32秒頃にかけてである。
- ⑤ さらに第2波(2段目)により10m盤のタンク周辺に大規模に浸水し始めたことが確認できる(写真17)時刻は、15時36分46秒頃であり、同タンクが水没した(写真19)時刻は、15時37分14秒頃と判断される。
- ⑥ 上記の補正時刻を用いてタンク等の浸水状況のグラフを描き直すと、次図のとおりである。
- ⑦ 第2波(1段目)の10m盤への遡上は限定的なものに留まったが、第2波(2段目)は10m盤に大量に遡上し、防波堤や波除堤をほぼ全面的に覆うような津波であったと判断される。



5. プラントデータに関する分析（分析Ⅲ）

5. 1. 目的

得られているプラントデータ（プロセス計算機や過渡現象記録装置）のうち、津波の来襲による被水等の異常が発生したことを示す以下のような情報が記録されている。

- ・ 海水系ポンプの停止時刻（モータの被水による影響等で遮断器が作動）
- ・ D/G の運転記録（電圧・電流）
- ・ 非常用電源盤の記録（母線電圧）

上記の情報のうち、最も敷地前面に設置されている海水系ポンプが津波の来襲による影響をはじめに受けやすいと考える。あわせて、主要建屋に設置されている電源盤や D/G の記録も補完情報として活用し、福島第一原子力発電所敷地への津波到達時刻を分析する。

5. 2. プラントデータの分析

プラントデータの活用に関して、以下の観点でスクリーニングを実施

- ・ 時刻補正機能があること
- ・ 分析に活用可能な電子データが収録されていること
- ・ 津波来襲の時刻近辺のデータが収録されていること

表にまとめると以下の通り

	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機
プロセス計算機 (電子保存機能の有無)	×	○	×	定期検査で 取り替え 工事中	○	×
過渡現象記録装置 (津波到達時のデータの有無)	○	○	×		×	×

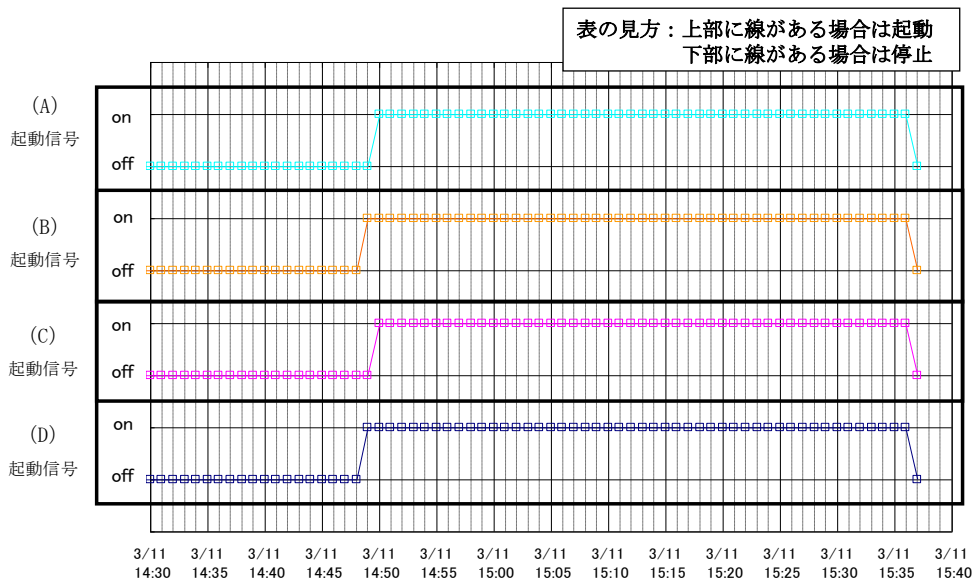
プロセス計算機（電子記録）については、2、5号機のみ存在しておりいずれも時刻補正機能を有している。過渡現象記録装置については、1、2号機のデータ（1号機は1分周期データ）が存在しており、いずれも時刻補正機能を有している。3号機の過渡現象記録装置は、3月11日14時59分43分付近にデータの途絶があるため、今回の分析からは除外する。4号機は、定期検査において取替工事を実施中であったためデータは採取されていない。5号機の過渡現象記録装置も津波到達時のデータがないため除外する。6号機は定期検査中であり過渡現象記録装置の収録機能を停止していた。

以上より1号機の過渡現象記録装置の1分周期データや2号機、5号機のプロセス計算機のデータを活用し分析を実施する。

【海水系ポンプの停止時刻】

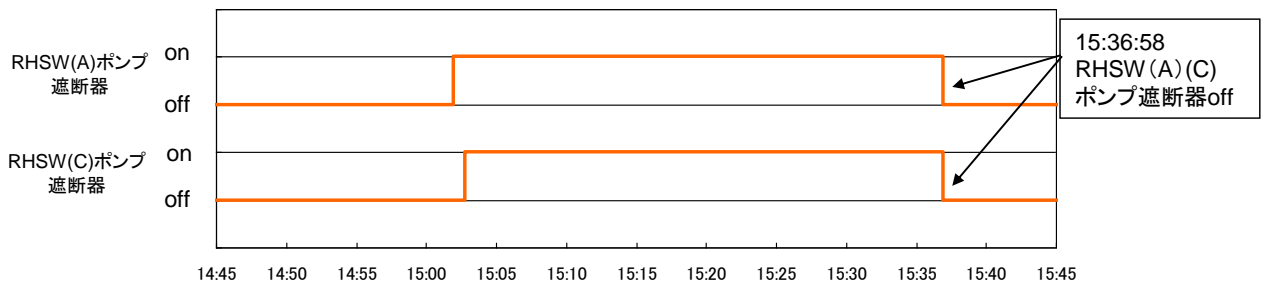
○1号機 格納容器冷却海水系 (CCSW) ポンプ

過渡現象記録装置の1分周期のデータから、CCSW ポンプ (A) ~ (D) は15時35分59秒から15時36分59秒の間に異常が発生し、機能喪失している事が記録されている。



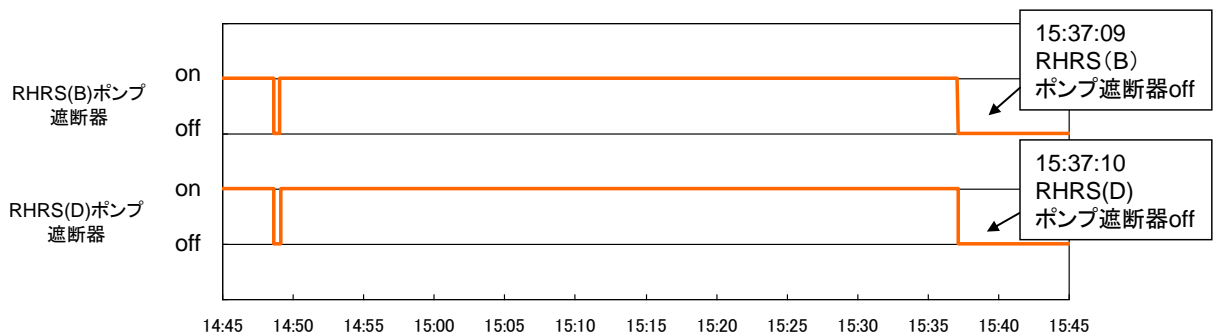
○2号機 残留熱除去系海水 (RHSW) ポンプ

プロセス計算機のデータから、RHSW ポンプ (A) 及び (C) の遮断器が15時36分58秒に off となり、機能喪失している事が記録されている。



○5号機 残留熱除去系海水 (RHRS) ポンプ

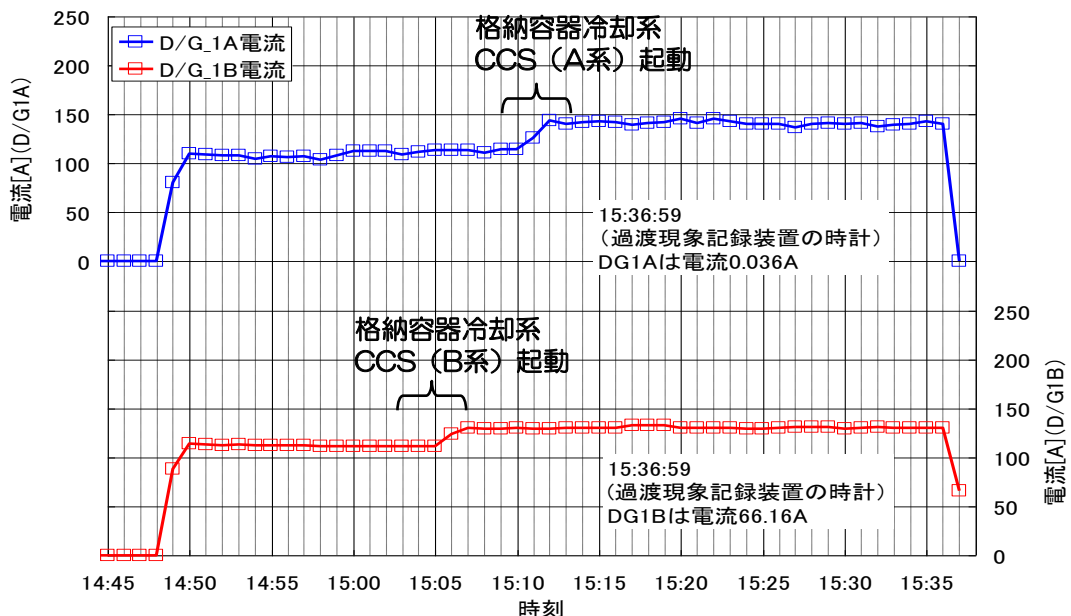
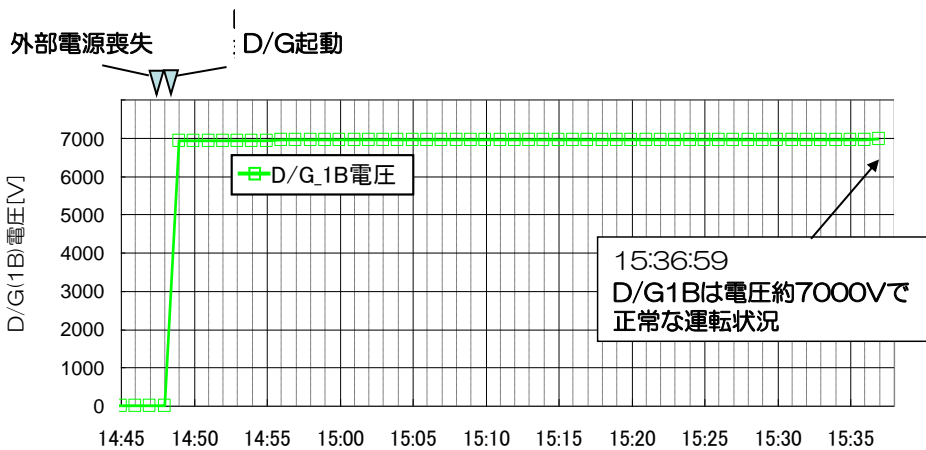
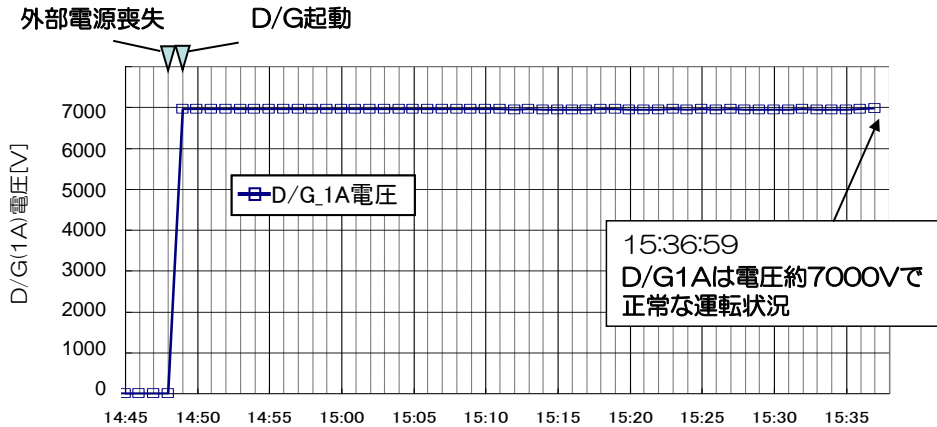
プロセス計算機のデータから、地震後に起動した RHRS ポンプ (B) 及び (D) については、15時37分9秒、10秒に異常が発生し、機能喪失している事が記録されている。



【D/Gの運転記録（電圧・電流）】

○1号機 D/G(1A)、(1B)

過渡現象記録装置の1分周期データから、1号機のD/G(1A)(1B)については、データが採取されている15時36分59秒まで電圧が確立していることから、機能喪失時刻は15時36分59秒以降であることが記録されている。

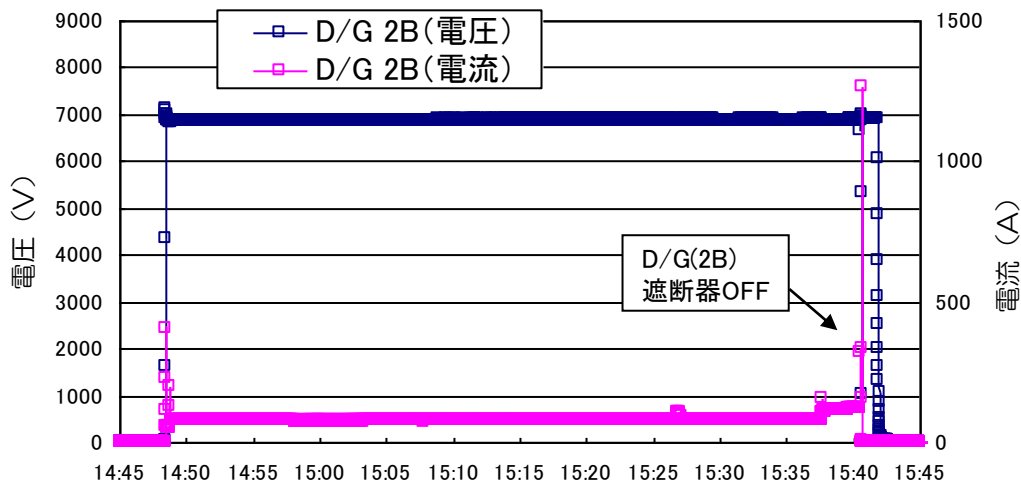
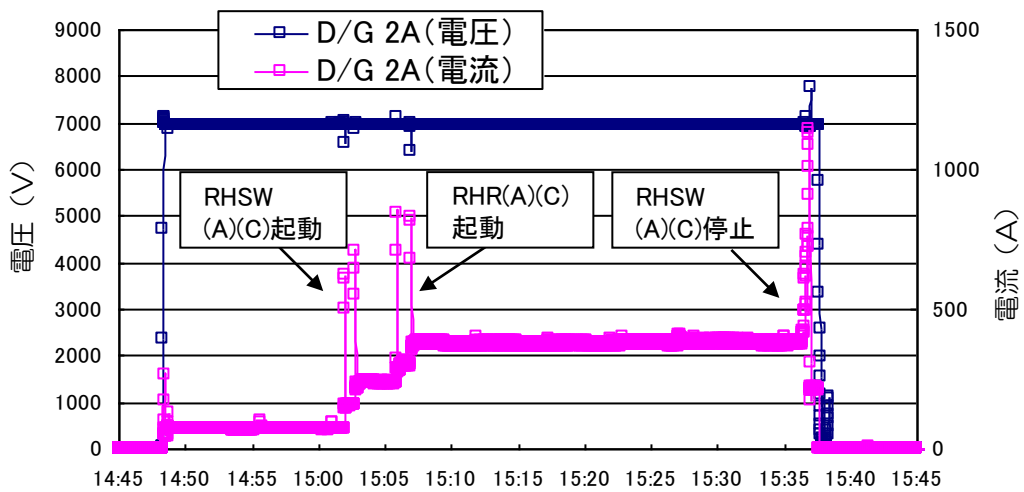
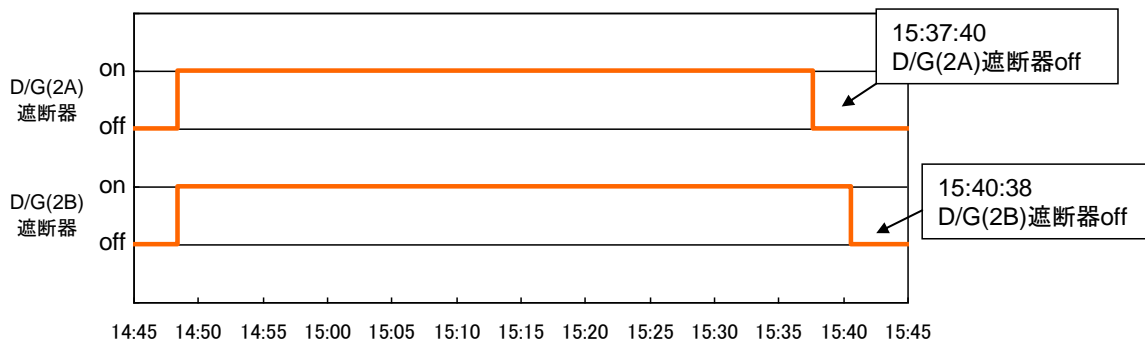


○2号機 D/G(2A)、(2B)

プロセス計算機のデータから、2号機のD/G(2A)の受電遮断器は、15時37分40秒に開放している事が記録されている。

D/G(2A)は、後日の調査で被水していることが確認されており、D/G本体もしくは関連機器の被水が原因で機能喪失したものと想定している。

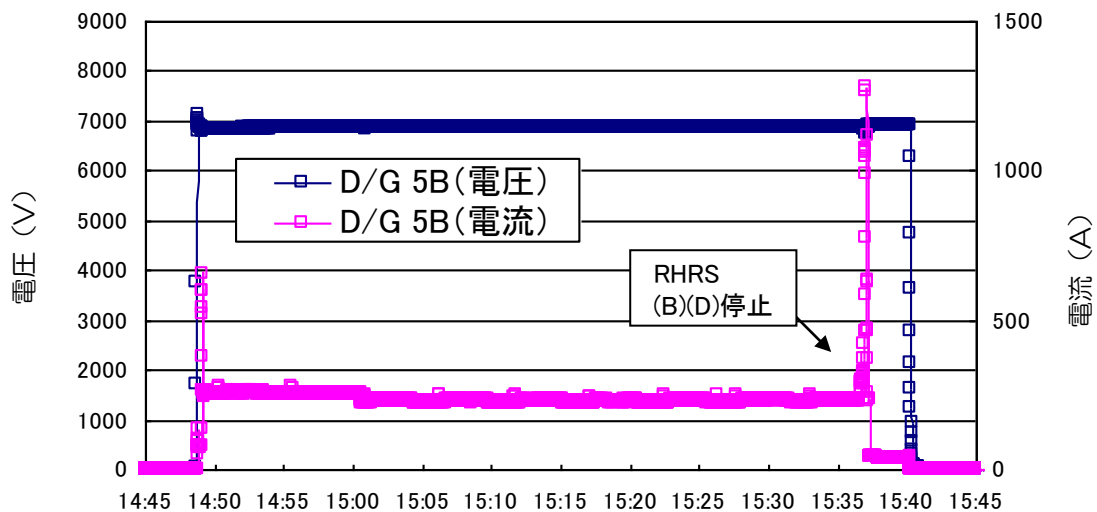
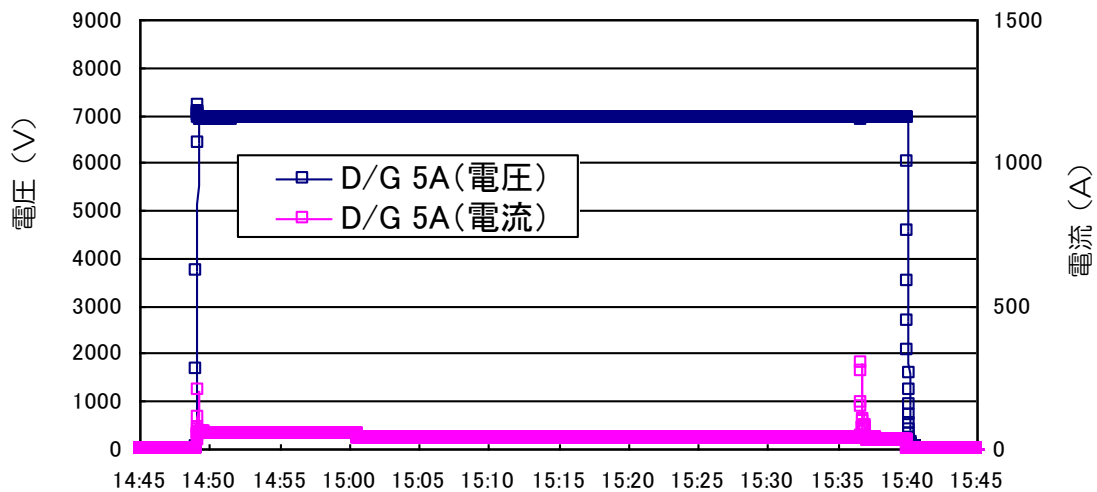
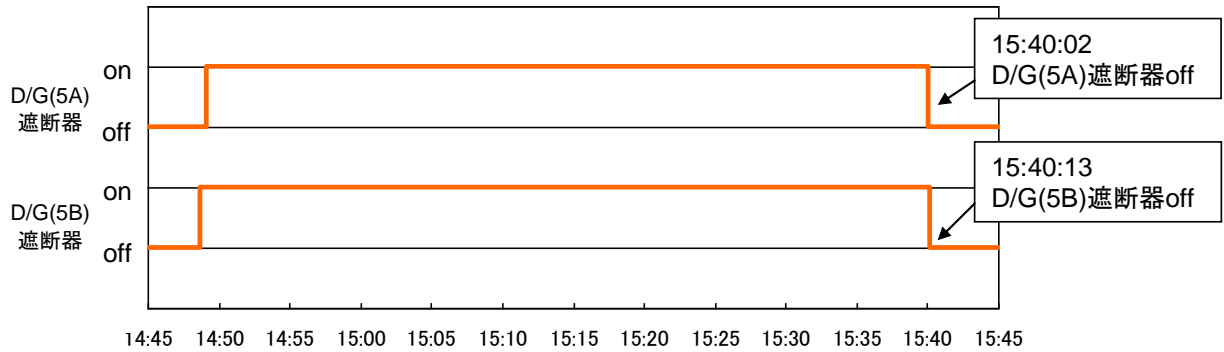
D/G(2B)は、別の建屋（共用プール建屋）に設置されており、D/G本体は津波の被害を受けていないが15時40分38秒に遮断器が開放している。D/Gの関連機器による影響もしくは電源供給先の非常用電源盤の被水等により機能を喪失したものと想定している。



○5号機 D/G(5A)、(5B)

プロセス計算機のデータから、5号機のD/G(5A) (5B) については、15時40分前後に異常が発生し、機能喪失している事が記録されている。

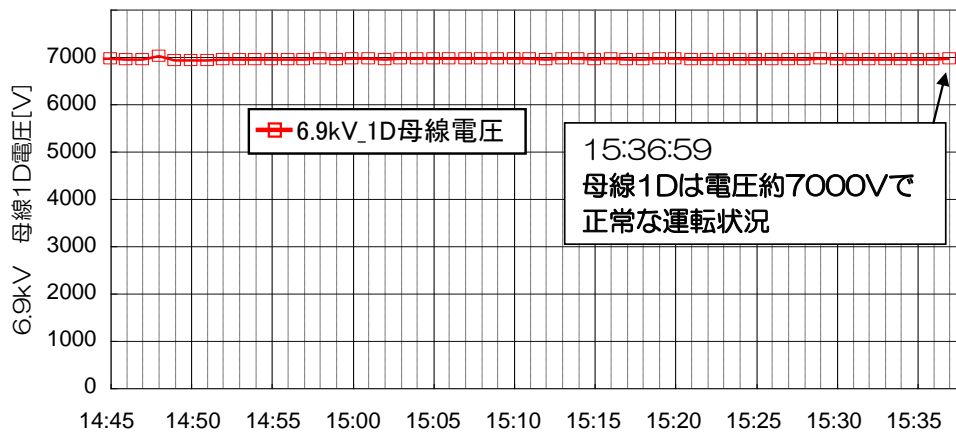
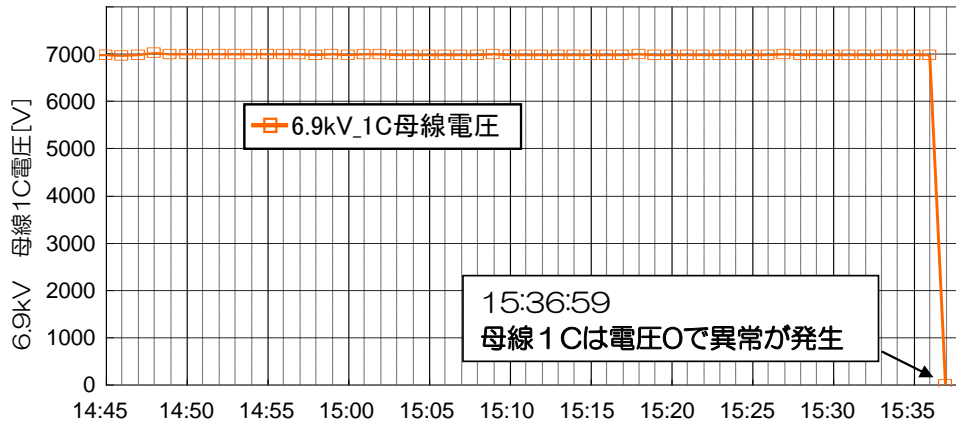
D/G(5A) (5B)は、後日の調査でD/G本体に被水の影響はないため、D/Gの関連機器による影響もしくは非常用電源盤の被水等により機能を喪失したものと想定している。



【非常用電源盤】

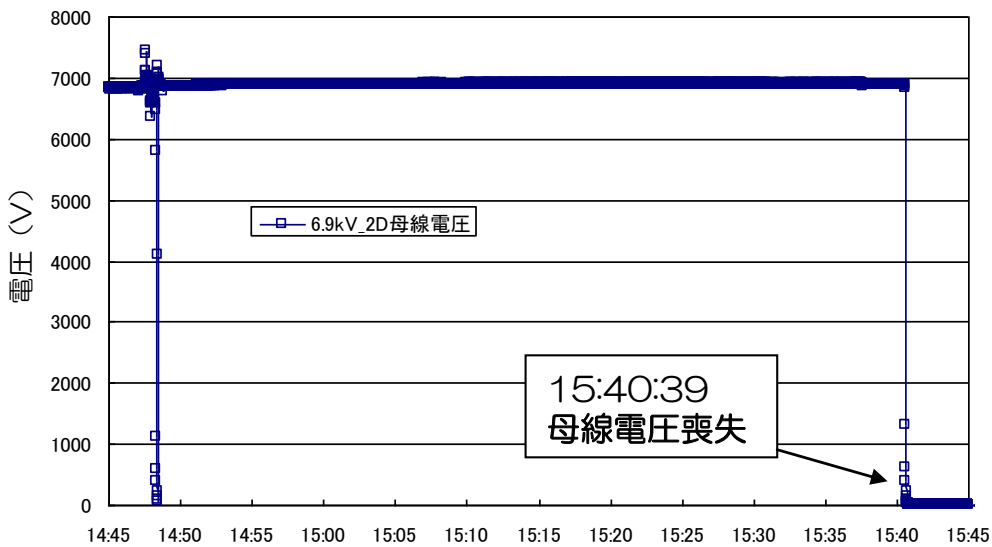
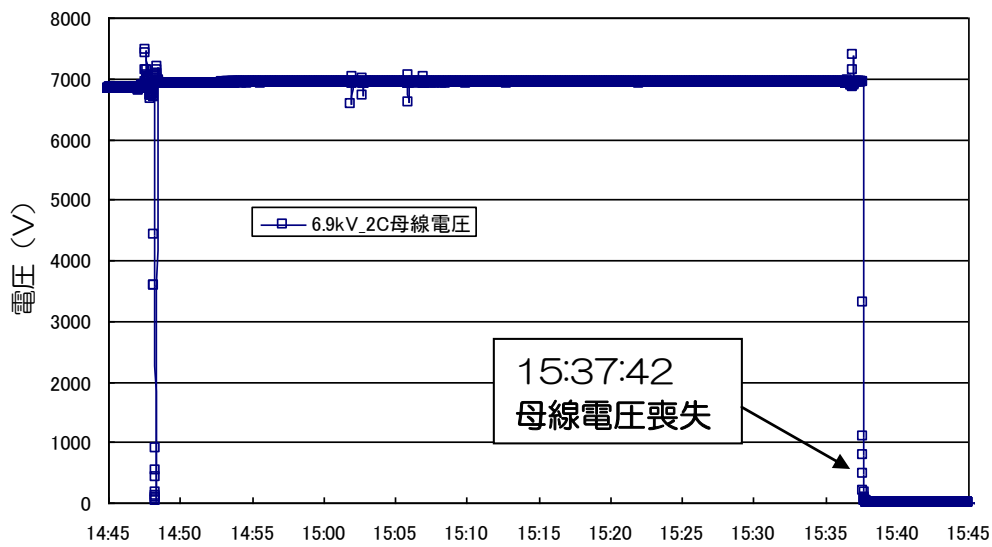
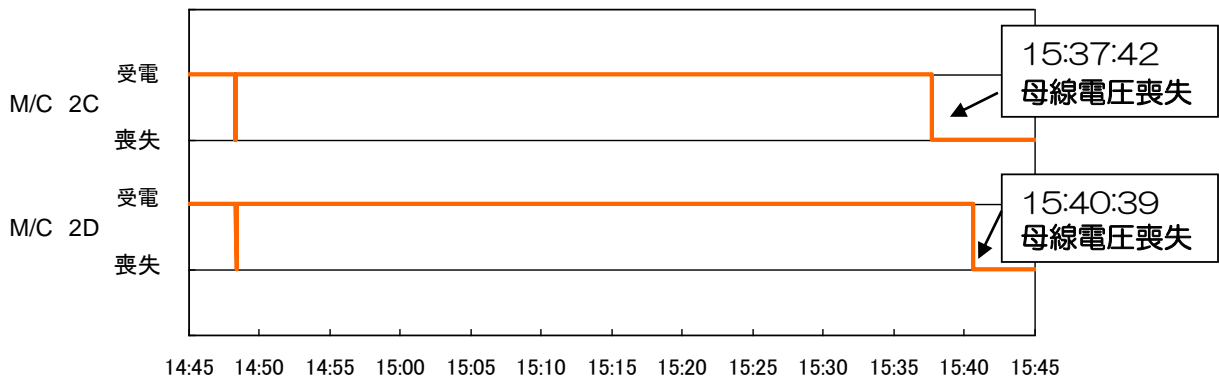
○1号機 非常用電源盤 1C、1D

過渡現象記録装置の1分周期データから、非常用電源盤1Cについては、15時35分59秒から15時36分59秒の間に非常用母線の電圧を喪失している。一方、非常用電源盤1Dについては、15時36分59秒まで電圧が確立していることから、機能喪失時刻は15時36分59秒以降であることが記録されている。



○2号機 非常用電源盤 2C、2D

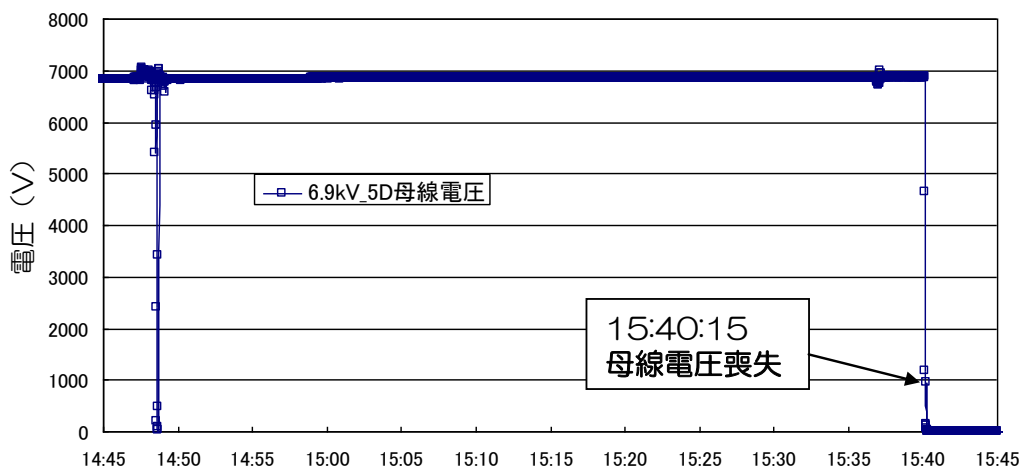
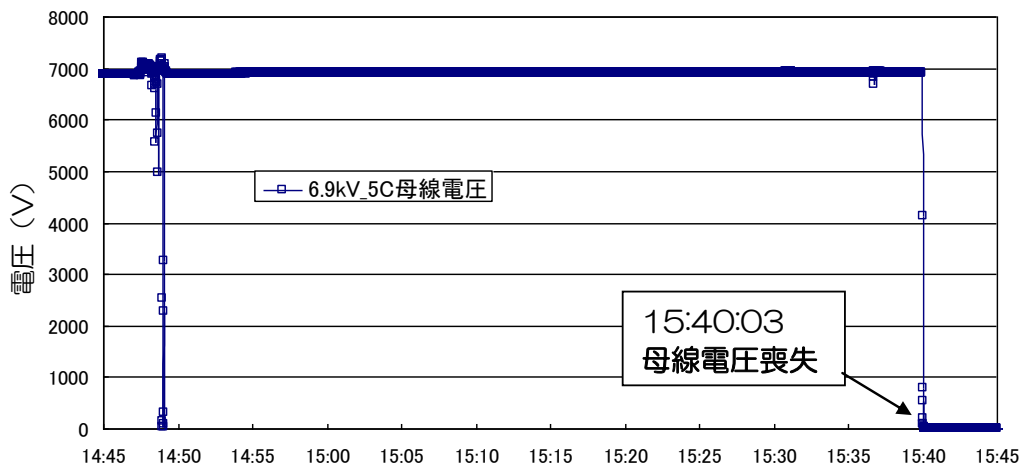
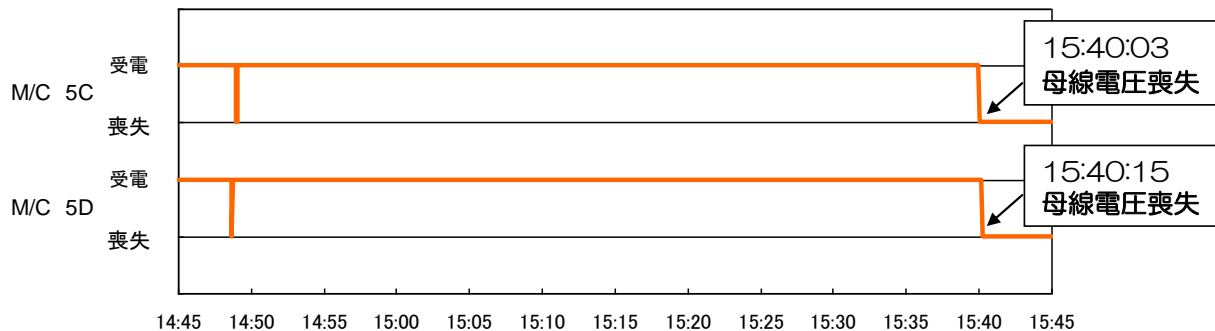
プロセス計算機データから、非常用電源盤 2C については、15 時 37 分 42 秒に非常用母線の電圧を喪失、非常用電源盤 2D は 15 時 40 分 39 秒に喪失している事が記録されている。



○5号機 非常用電源盤 5C、5D

プロセス計算機データから、非常用電源盤 5C については、15 時 40 分 03 秒に非常用母線の電圧を喪失、非常用電源盤 5D は 15 時 40 分 15 秒に喪失している事が記録されている。

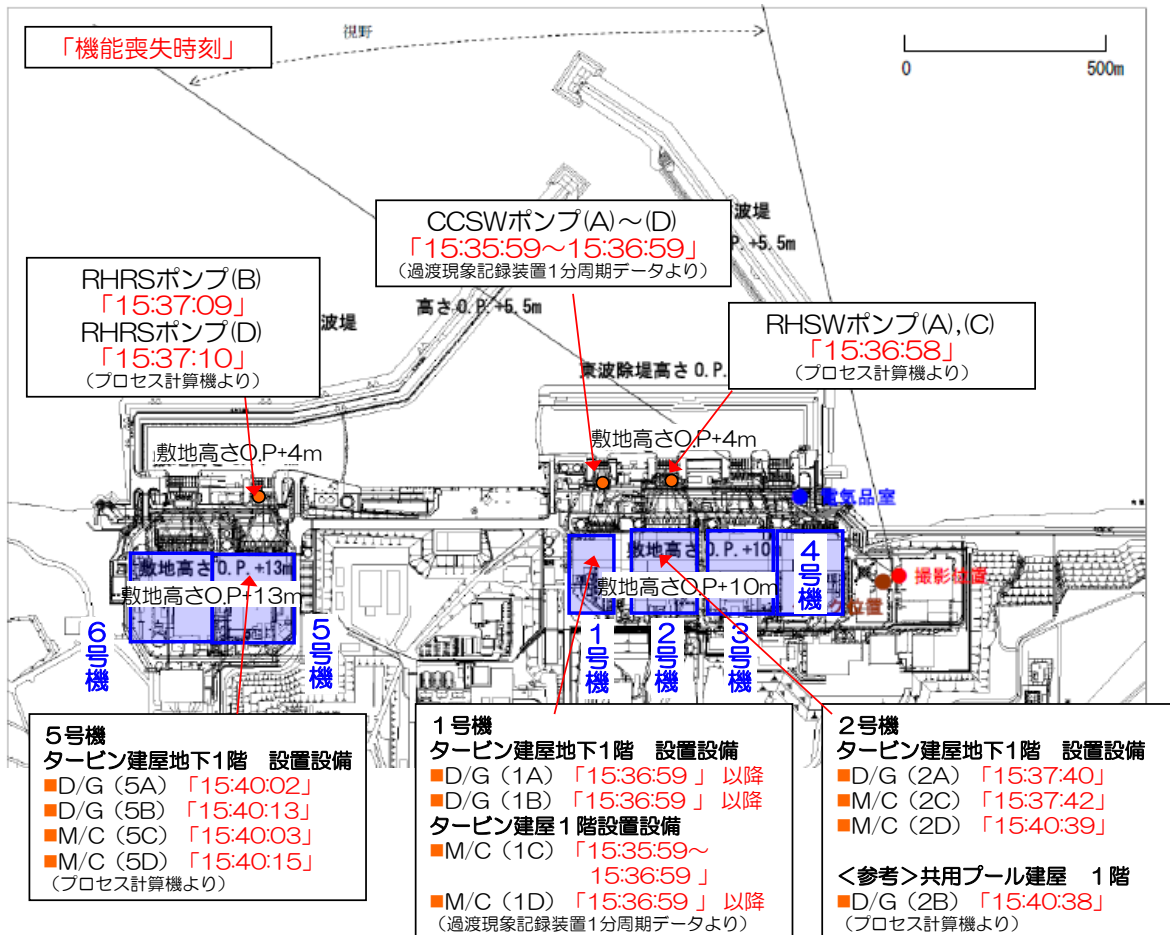
事故後の調査で、D/G に異常はなく、M/C が被水していたことから、被水による M/C の機能喪失もしくは D/G の関連機器が被水等により機能を喪失したものと想定している。



5. 3. プラントデータに関する分析まとめ (分析Ⅲ)

以上より、最も海側に近い海水系ポンプ (高さ OP+4m に設置) は、概ね 15 時 36 分台で喪失しており、津波第 2 波が敷地に到着したことによるものと想定される。

その他の主要建屋では、設置場所により機能喪失のタイミングが異なるが、概ね 15 時 40 分前後で非常用母線の機能が喪失しており、全交流電源を失う結果となっている。



6. まとめ

これまでの分析Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの結果をまとめると以下のように整理される。

分析Ⅰの結果、波高計の時刻は大きなずれがないと判断される。

分析Ⅱの結果、写真の時刻は6分40秒程度のずれが生じているものと判断する。またカメラ内蔵の時刻を補正した結果、下記のように判断される。

✓15時36分00秒頃

⇒津波第2波（1段目）により10m盤のタンク周辺に小規模に浸水し始めたことが確認できる時刻

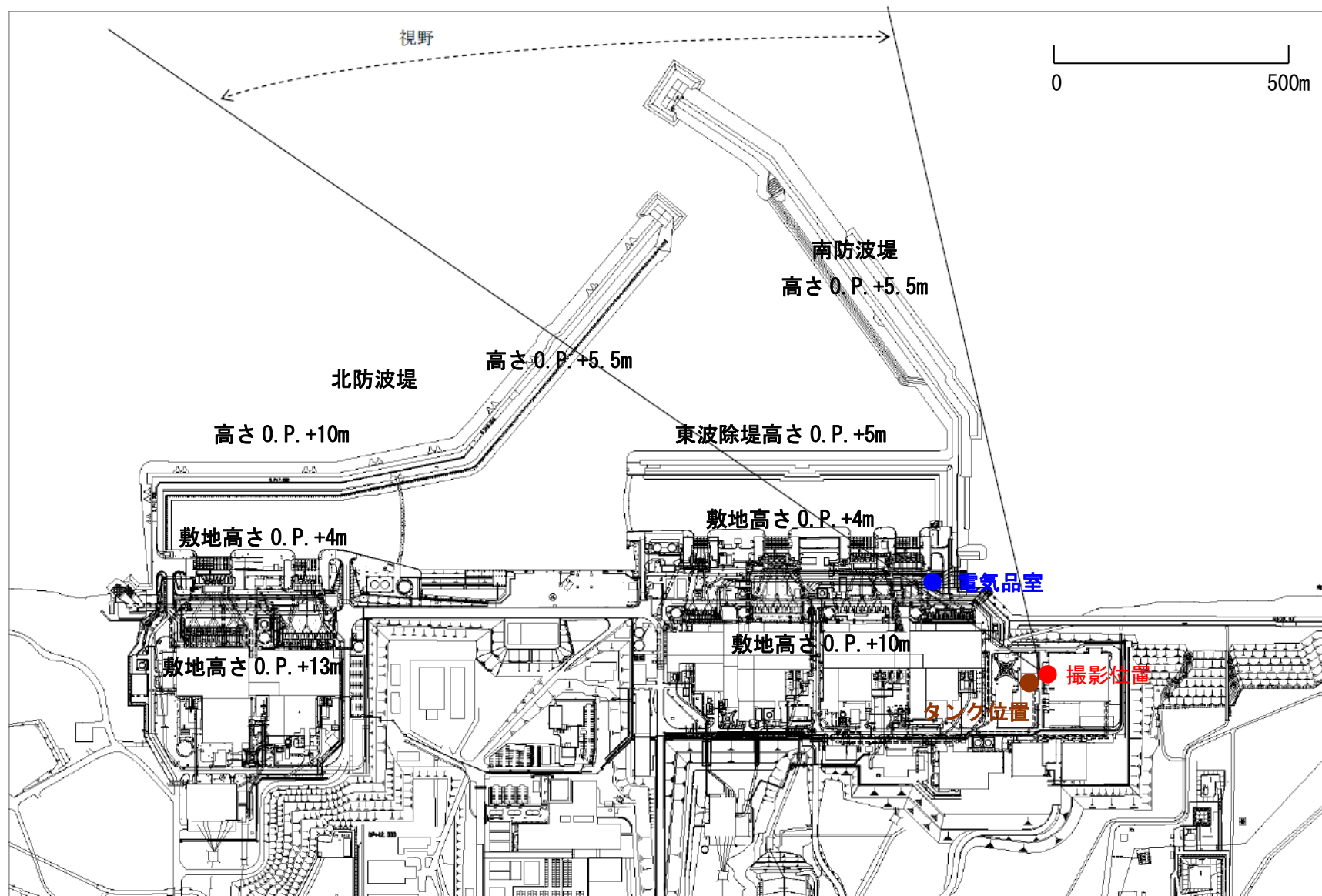
✓15時36分46秒頃

⇒津波第2波（2段目）により10m盤のタンク周辺に大規模に浸水し始めたことが確認できる時刻

分析Ⅲのプラントデータから津波第2波が敷地に到着した時刻は15時36分台と推定される。また、最も海側に近い海水系ポンプは、津波第2波が敷地に到達したことにより概ね15時36分台に機能喪失し、続いて、15時40分前後で非常用母線の機能が喪失しており、津波が原因で全交流電源を失う結果となっている。

以上の分析結果（写真の時刻とプラントデータ）を踏まえ、当社は敷地への津波到達時間は15時36分台と考えている。

【参考1】連続写真の位置関係

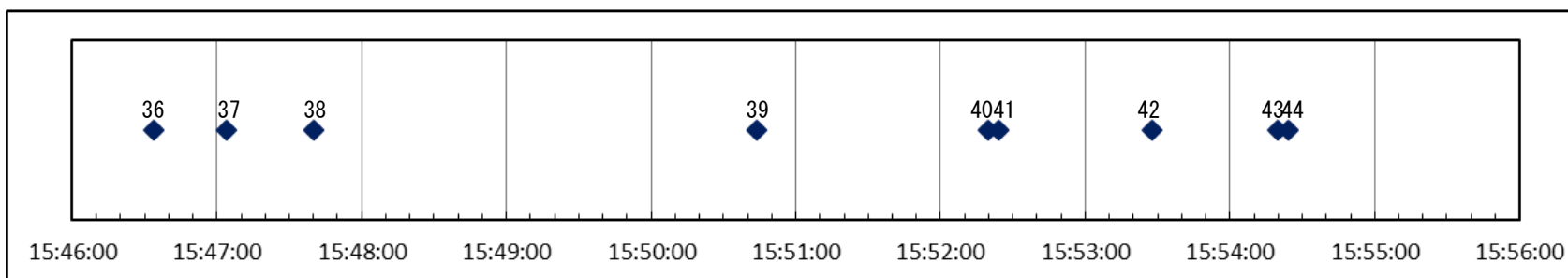
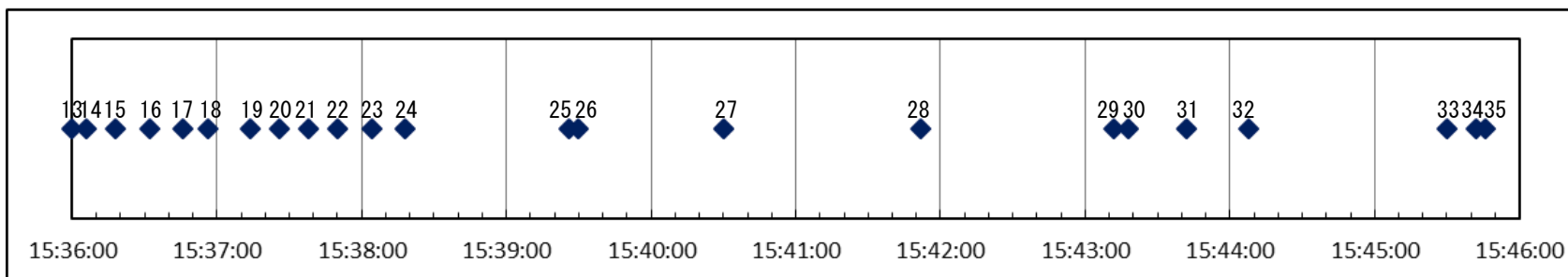
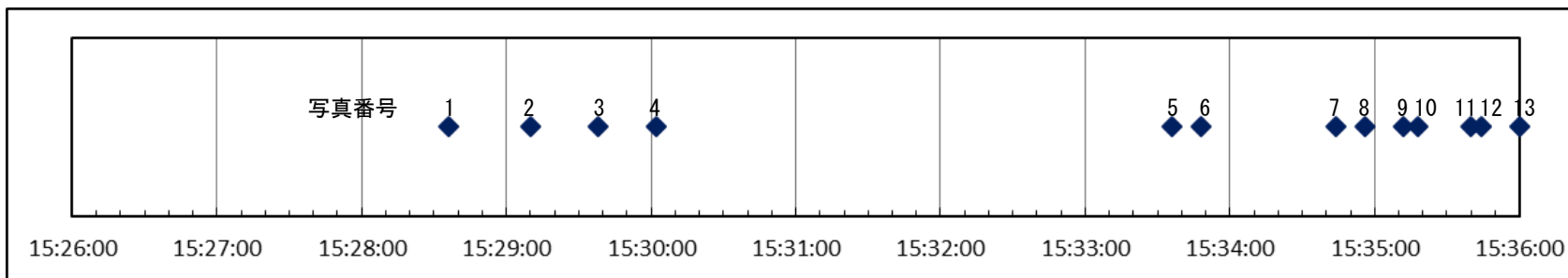


【参考2】連続写真全44枚

写真の撮影時刻（補正後）

カメラの内蔵時刻は実際の時間よりも、6分31秒～6分50秒程度進んでいたと評価。

下記のグラフでは平均6分40秒進んでいたとして撮影時刻を補正。（例：カメラ撮影時刻で15時35分16秒の写真の時刻は15時28分36秒とした。）



写真左上の凡例

写真番号 (写真番号 1 からの経過時間)
補正後の時刻 (補正後時刻)
補正前の時刻 (補正前のカメラ内蔵時刻)

1 (00分00秒後)

15時28分36秒頃 (補正後時刻)

15時35分16秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



2 (00分34秒後)

15時29分10秒頃 (補正後時刻)

15時35分50秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



3 (01分02秒後)

15時29分38秒頃 (補正後時刻)

15時36分18秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



4 (01分26秒後)

15時30分02秒頃 (補正後時刻)

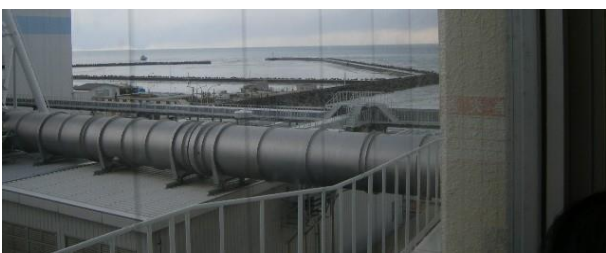
15時36分42秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



5 (05分00秒後)

15時33分36秒頃 (補正後時刻)

15時40分16秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



6 (05分12秒後)

15時33分48秒頃 (補正後時刻)

15時40分28秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



7 (06分08秒後)

15時34分44秒頃 (補正後時刻)

15時41分24秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



8 (06分20秒後)

15時34分56秒頃 (補正後時刻)

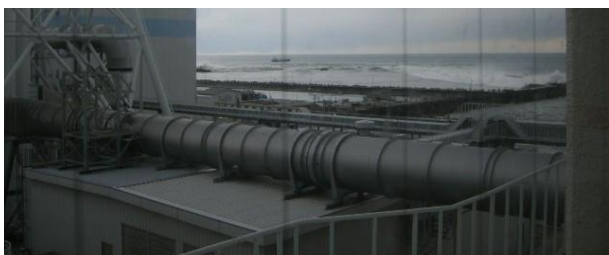
15時41分36秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



9 (06分36秒後)

15時35分12秒頃 (補正後時刻)

15時41分52秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



10 (06分42秒後)

15時35分18秒頃 (補正後時刻)

15時41分58秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



11 (07分04秒後)

15時35分40秒頃 (補正後時刻)

15時42分20秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



12 (07分08秒後)

15時35分44秒頃 (補正後時刻)

15時42分24秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



13 (07分24秒後)

15時36分00秒頃 (補正後時刻)

15時42分40秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



14 (07分30秒後)

15時36分06秒頃 (補正後時刻)

15時42分46秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



15 (07分42秒後)

15時36分18秒頃 (補正後時刻)

15時42分58秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



16 (07分56秒後)

15時36分32秒頃 (補正後時刻)

15時43分12秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



17 (08分10秒後)

15時36分46秒頃 (補正後時刻)

15時43分26秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



18 (08分20秒後)

15時36分56秒頃 (補正後時刻)

15時43分36秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



19 (08分38秒後)

15時37分14秒頃 (補正後時刻)

15時43分54秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



以上は、本文掲載写真の再掲。

20 (08分50秒後)

15時37分26秒頃 (補正後時刻)

15時44分06秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



21 (09分02秒後)

15時37分38秒頃 (補正後時刻)

15時44分18秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



22 (09分14秒後)

15時37分50秒頃 (補正後時刻)

15時44分30秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



23 (09分28秒後)

15時38分04秒頃 (補正後時刻)

15時44分44秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



24 (09分42秒後)

15時38分18秒頃 (補正後時刻)

15時44分58秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



25 (10分50秒後)

15時39分26秒頃 (補正後時刻)

15時46分06秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



26 (10分54秒後)

15時39分30秒頃 (補正後時刻)

15時46分10秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



27 (11分54秒後)

15時40分30秒頃 (補正後時刻)

15時47分10秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



28 (13分16秒後)

15時41分52秒頃 (補正後時刻)

15時48分32秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



29 (14分36秒後)

15時43分12秒頃 (補正後時刻)

15時49分52秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



30 (14分42秒後)

15時43分18秒頃 (補正後時刻)

15時49分58秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



31 (15分06秒後)

15時43分42秒頃 (補正後時刻)

15時50分22秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



32 (15分32秒後)

15時44分08秒頃 (補正後時刻)

15時50分48秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



33 (16分54秒後)

15時45分30秒頃 (補正後時刻)

15時52分10秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



34 (17分06秒後)

15時45分42秒頃 (補正後時刻)

15時52分22秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



35 (17分10秒後)

15時45分46秒頃 (補正後時刻)

15時52分26秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



36 (17分58秒後)

15時46分34秒頃 (補正後時刻)

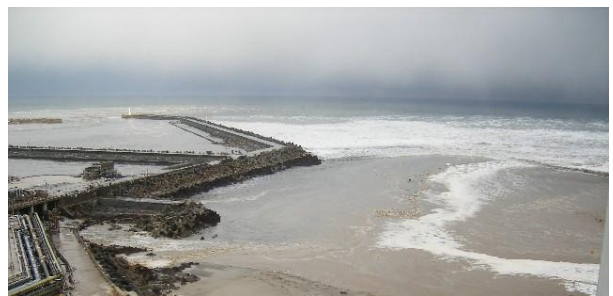
15時53分14秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



37 (18分28秒後)

15時47分04秒頃 (補正後時刻)

15時53分44秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



38 (19分04秒後)

15時47分40秒頃 (補正後時刻)

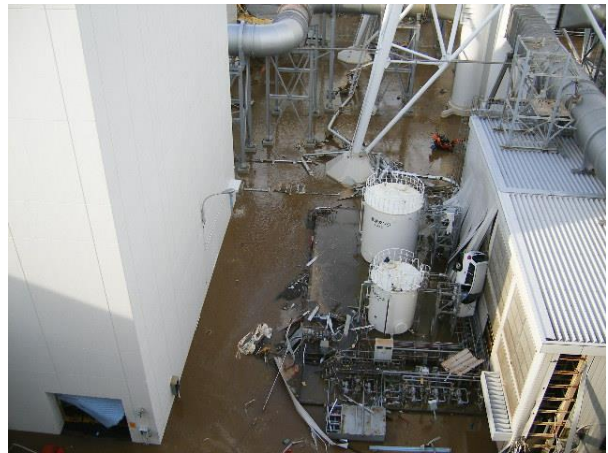
15時54分20秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



39 (22分08秒後)

15時50分44秒頃 (補正後時刻)

15時57分24秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



40 (23分44秒後)

15時52分20秒頃 (補正後時刻)

15時59分00秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



41 (23分48秒後)

15時52分24秒頃 (補正後時刻)

15時59分04秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



42 (24分52秒後)

15時53分28秒頃 (補正後時刻)

16時00分08秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



43 (25分44秒後)

15時54分20秒頃 (補正後時刻)

16時01分00秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)



44 (25分48秒後)

15時54分24秒頃 (補正後時刻)

16時01分04秒 (補正前のカメラ内蔵時刻)

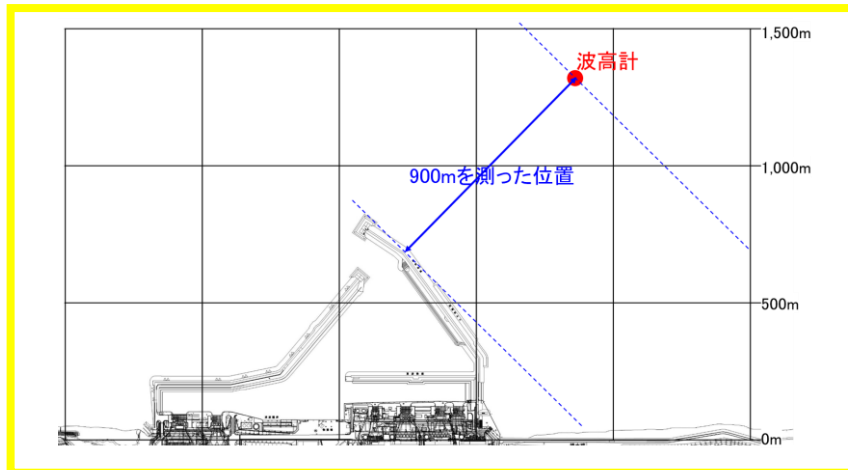


【参考3】波高計から南防波堤屈曲部までの距離の取り方

本検討では、波高計から南防波堤屈曲部までの距離は900m程度とした。

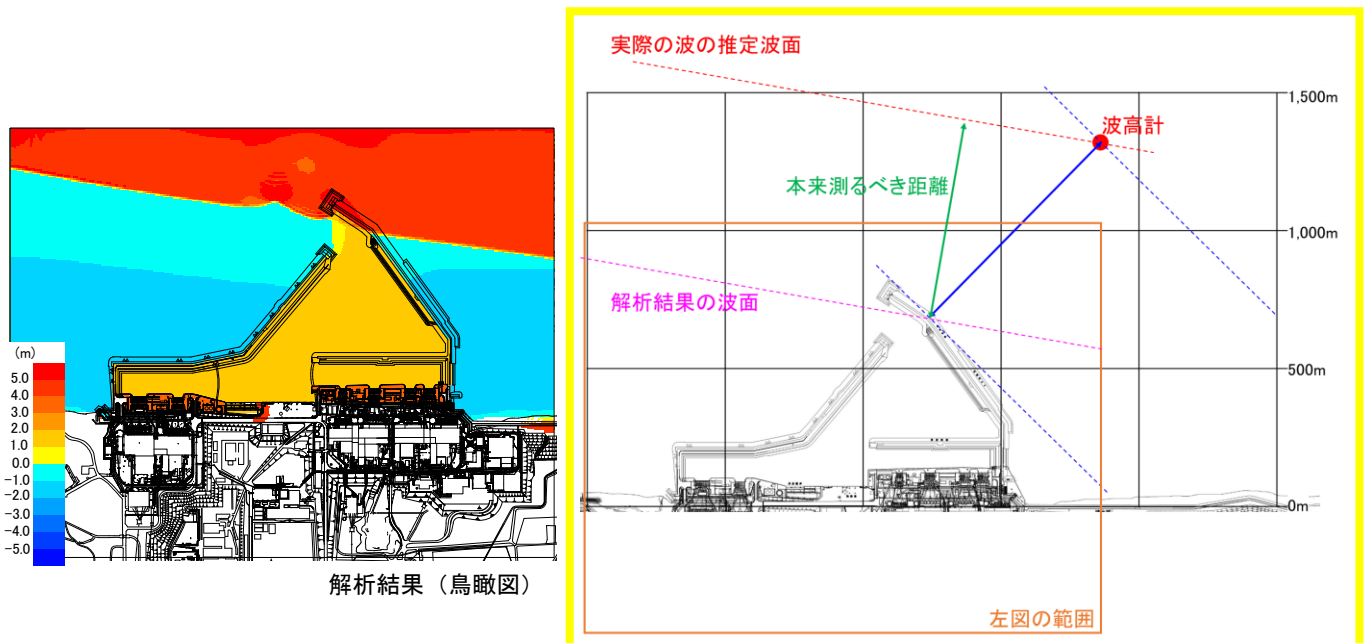
この距離の取り方は、以下の通りやや長め、すなわち、所要時間を多めに見積もる取り方となっていると考えられる。

本検討で距離900mを取った位置関係は下図のようになり、2点を結ぶ両矢印線に垂直な破線の波面を仮想していることになる。



津波再現シミュレーションによると、波面は下図のような角度となっている。

再現シミュレーションでは、波形や到達時刻は厳密には実際とは合っていないものの、波面の向きは海底地形に支配されることから、津波再現シミュレーションは実際の波面の向きにほぼ等しいものと判断できる。



以上のことから、900m という距離は、実際の津波の移動距離よりも長く、すなわち、所要時間を多めに見積もる取り方となっていると考えられる。

【参考 4】波高計から南防波堤までの第 2 波（1 段目）の伝播所要時間

a. 静水深に基づく推定波速から算出した所要時間

所要時間を長めに評価する観点から、水深に津波高さを考慮せず、静水深 h を用い、以下の方法にて所要時間の推定を行う。

- ・ 波高計設置位置から南防波堤屈曲部までの距離約 900m を 50m ずつ 18 区間に分割する。
- ・ 波高計設置位置の水深は約 13m、南防波堤屈曲部の水深は約 6m であり、この間の海底勾配は一定であると仮定する。
- ・ 津波波速の近似式 $c=(gh)^{1/2}$ に、区間ごとの平均水深を適用して波速を算定する。
- ・ 津波が各区間を通過する所要時間を算定する。
- ・ 次ページの表による算定の結果、波高計設置位置から南防波堤屈曲部までの所要時間は約 95 秒と推定された。

b. 全水深に基づく推定波速から算出した所要時間

より実際に近い評価を行うため、水深に津波高さを加算した全水深（＝静水深＋津波高さ）を用いる。

- ・ グリーンの法則： $H2/H1 = (h1/h2)^{1/4}$ を適用して、各区間での津波高さ $H2$ を算定する。
- ・ 波高 $H1$ の初期値は、波高計設置位置の第 2 波（第 1 段）の波高計記録から 4.5m とする。
- ・ $h1$ の初期値は、波高計設置位置の水深約 13m。
- ・ 水深に津波高さを加算した全水深（＝静水深＋津波高さ）を用い、a. と同様の方法にて所要時間の推定を行う。
- ・ 次ページの表による算定の結果、波高計設置位置から南防波堤屈曲部までの所要時間は約 76 秒と推定された。

以上のことから、波高計設置位置から港湾付近までの所要時間を 76～95 秒と推定する。

波高計からの 距離[m]	a. 静水深に基づく検討			b. 全水深に基づく検討			
	区間平均 水深[m]	静水深を用 いた近似式 から求まる 波速[m/s]	区間ごとの 所要時間 [s]	グリーンの 法則から求 まる波高 [m]	区間平均 水深[m]	全水深を用 いた近似式 から求まる 波速[m/s]	区間ごとの 所要時間 [s]
0~50	12.8	11.2	4.5	4.5	17.3	13.0	3.8
50~100	12.4	11.0	4.5	4.6	17.0	12.9	3.9
100~150	12.0	10.9	4.6	4.6	16.6	12.8	3.9
150~200	11.6	10.7	4.7	4.6	16.3	12.6	4.0
200~250	11.3	10.5	4.8	4.7	15.9	12.5	4.0
250~300	10.9	10.3	4.8	4.7	15.6	12.4	4.0
300~350	10.5	10.1	4.9	4.7	15.2	12.2	4.1
350~400	10.1	9.9	5.0	4.8	14.9	12.1	4.1
400~450	9.7	9.7	5.1	4.8	14.5	11.9	4.2
450~500	9.3	9.5	5.2	4.9	14.2	11.8	4.2
500~550	8.9	9.3	5.3	4.9	13.9	11.7	4.3
550~600	8.5	9.1	5.5	5.0	13.5	11.5	4.3
600~650	8.1	8.9	5.6	5.1	13.2	11.4	4.4
650~700	7.7	8.7	5.7	5.1	12.9	11.2	4.5
700~750	7.4	8.5	5.9	5.2	12.5	11.1	4.5
750~800	7.0	8.3	6.0	5.3	12.2	10.9	4.6
800~850	6.6	8.0	6.2	5.3	11.9	10.8	4.6
850~900	6.2	7.8	6.4	5.4	11.6	10.7	4.7
	所要時間の合計[s]		94.7		所要時間の合計[s]		76.1