

別 添

「柏崎刈羽原子力発電所 3 号機所内変圧器 3 B の火災について」
(中間報告)

平成 1 9 年 8 月 2 3 日

東京電力株式会社

1. 事象発生の日時

平成19年7月16日 10時15分(火災発生確認)

2. 事象発生の電気工作物

柏崎刈羽原子力発電所3号機 所内変圧器3B

3. 事象発生前の運転状況

定格熱出力一定運転中

4. 事象発生時の状況

平成19年7月16日10時13分に発生した新潟県中越沖地震後、10時15分、運転員が3号機所内変圧器3Bからの発煙を確認し、12時10分、消防署により鎮火が確認された。その後、地上からの外観目視点検を中心に調査を行い、以下のことを確認した。

- ・ 当該変圧器と当該変圧器二次側の接続母線部が上下にずれていること。
- ・ 当該変圧器二次側のブッシングから漏油していること。
- ・ 当該変圧器二次側の接続母線部の接続ダクトに激しく火災の痕跡があり、母線部にあいた穴から目視調査をしたところ、母線部の一部が溶損・破断していること。

(事象に鑑み、電気関係報告規則第3条第1項第3号に基づく報告事象であると判断)

なお、当該変圧器横に設置されている防火壁によって隣接する所内変圧器3Aや他設備に延焼することはなかった。

(添付資料 - 1、2)

5. 現場調査

新潟県中越沖地震の影響で発生した所内変圧器3Bの火災事象について、鎮火後に調査を行った。調査にあたっては所内変圧器3Bが火災に至った要因について、漏油と放電のそれぞれに対し要因分析表に基づく考察を行い、調査項目を抽出した。

(添付資料 - 3、4、5、6)

(1) 漏油発生部位

漏油が想定される全ての部位(タンク溶接部/一次ブッシング/二次ブッシング/油配管など)について調査を行った。その結果、漏油が確認された部位は、二次ブッシング部のみであった。

二次ブッシングは上段、下段合わせて8本(含む中性点)あるが、全てのブッシング碍管に割れがあり、特に上段W相、下段W相は中心導体が一部見える状態であり、火災鎮火後も漏油が継続していた。その他のブッシングも碍管が割れていることから漏油していたものと考えられる。

(2) 放電発生部位

放電発生が想定される全ての部位(一次ブッシング/一次側接続端子部導体/二次ブッシング/二次側接続母線部導体/内部リード)について調査を行った。その結果、二次側接続母線部ダクトが変圧器本体に対し約16~18cm下がっていることが確認された。また、火災による損傷が大きいため放電による損傷との区別が難しい状況であったが、放電の痕跡と思われる金属部品の溶損が観測された部位は、二次側接続母線部、ダクト内に収納された部品のみであった(上段、下段とも)。具体的には二次ブッシングに取付けた導体(端子部含む)

ダクトである。

なお、変圧器内部を点検窓から目視点検した結果、燃焼によるすす、炭化した絶縁油などの直接的な火災の痕跡が認められないこと、火災発生後に実施した油中ガス分析結果から変圧器内部での異常を示す様相は見られなかったことから、変圧器内部故障が火災の一次要因である可能性はない。

6. 現地調査結果を踏まえた火災発生の推定メカニズム

前項の調査結果から、火災発生に至る要因としての漏油、放電(火種)、空気の3要素が揃っているのは二次側接続母線部ダクト内部であり、この部位において漏油、放電が発生し、着火延焼に至ったと考えられる。

調査結果を踏まえた、漏油、放電、着火延焼の推定メカニズムは以下のとおり。

(添付資料 - 7)

(1) 漏油発生の推定メカニズム

漏油は二次ブッシングが破損した部位から発生していた。

今回の地震により変圧器周囲の基礎面が沈下し、二次側接続母線部ダクトが変圧器本体に対し約16～18cm下がっている。変圧器本体は鋼管杭を岩盤まで打ち込んだ杭基礎構造、二次側接続母線部ダクトは直接基礎構造により支えられており、その基礎構造の違いにより地震による地盤変動によって基礎面の沈下量に差が発生したものと考えられる。

二次側接続母線部ダクトの高さは約40cm、ブッシング端子部の高さが約15cmであり、端子とダクト上面内面との間隙は約12cm程度であることから、基礎面の沈下でダクトが落下した際に、ブッシング端子部と接触すると考えられる。

(添付資料 - 8)

ダクトが接触した際の衝撃及び二次側接続母線部側導体の変位による下方向への引っ張りによりブッシング碍管が破損したため、変圧器内部の絶縁油がブッシングを通して噴出したと考えられる。

(2) 放電発生の推定メカニズム

発電機回路の電圧及び電流の記録を調査したところ、発電機回路のロックアウトリレー(86G)動作後約1.6秒の時点で、一旦ゼロになっていた発電機電流が約18.6kAに急上昇し、その後約6秒かけて減衰するとともに、発電機電圧が約17.2kVから約13.2kVに急激に低下した記録がなされていることが判明した。

このことから、放電発生は地震により二次側接続母線部ダクトが落下した際に、ダクトがブッシング端子部と接触し三相地絡短絡を引き起こし、大電流のアーク放電が発生したものと考えられる。これを裏付けるものとして、変圧器ブッシング端子部分の導体取り付け部の上面にアーク放電によるものとみられる溶損痕があることを現場調査によって確認している。

なお、タービントリップによる86G動作により発電機遮断器および界磁遮断器が開放されても、慣性による発電機の回転と発電機内に残留している磁界によって、しばらくの間電力が発生しているため、86G動作後も変圧器に発電機から電力が供給されたと考えられる。この電力による変圧器の電流は三相とも同時にかつ同一レベルで発生していることが記録されており、地震によるダクトと変圧器ブッシングの接触が三相地絡・短絡故障につながっ

たものと推定される。

(添付資料 - 9)

(3) 着火延焼の推定メカニズム

前記(1)に示すとおり変圧器ブッシング部から噴出した絶縁油に約1,000以上のアーク放電が発生したため、引火点が130以上である絶縁油に引火し、二次側接続母線部ダクト内で火災が発生したと考えられる。なお、上記放電において発生したアーク電流は発電機回路の電流の記録から約50kA程度と推定される。

この故障電流が減衰しながらとはいえ、約6秒程度継続したことで二次側接続母線部内面は著しく損傷し、導体の溶損、ダクト上面及び側面の溶損(穴が開いた)に至ったと考えられる。その後、変圧器本体との接続部などの開口部分から着火した油が流出し、基礎面にて延焼したものと考えられる。

7. 推定原因

所内変圧器3Bの火災の原因は以下のとおりと推定した。

- (1) 今回の地震により変圧器と周囲の基礎面が沈下した際、沈下量に差が発生し、二次側接続母線部ダクトが変圧器側接続部より約16~18cm落下して変圧器二次ブッシング端子部に接触した。
- (2) この際の衝撃及び二次側接続母線部側導体の変位による下方向への引っ張りにより変圧器二次ブッシング碍管が損傷し漏油が発生した。
- (3) 加えてダクトが落下した際に、ダクトがブッシング端子部と接触し三相地絡・短絡を引き起こし、大電流のアーク放電が火種となって変圧器火災が発生した。
- (4) さらに変圧器二次側と二次側接続母線部ダクトの接続部が損傷開口したため、その部分から着火した絶縁油が基礎面上に流出し、延焼した。

8. 対策

事象の原因調査結果を踏まえ、必要な対策について検討中。

以上

添付資料

- (1) 所内変圧器 3 B 仕様
- (2) 柏崎刈羽原子力発電所 3 号機 単線結線図
- (3) 所内変圧器 3 B 火災に至る事象の要因分析表
- (4) 所内変圧器 3 B 外形図
- (5) 所内変圧器 3 B 外観調査結果
- (6) 所内変圧器 3 B 油中ガス分析結果
- (7) 地震発生から火災発生に至るフロー (調査結果からの推定)
- (8) 所内変圧器 3 B 周辺基礎構造概念図
- (9) 放電発生状況の調査結果

所内変圧器 3 B 仕様

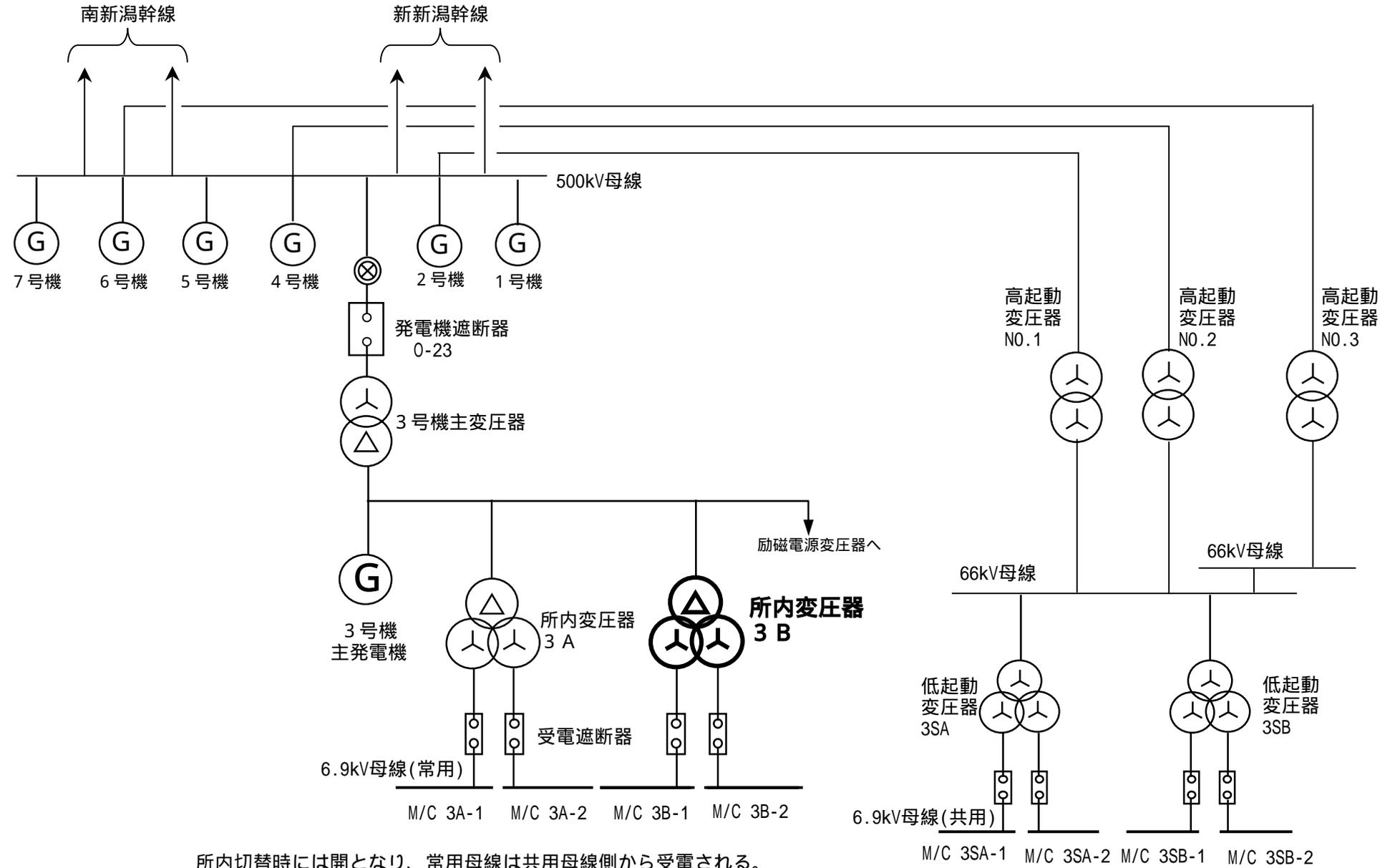
(工事計画申請書記載)

種 類	-	屋外用三相三巻線無圧密封式	
容 量	kVA	40000 / 20000 - 20000	
電 圧	一次	kV 19.451 / 18.988 / 18.525 / 18.062 / 17.599 (使用タップ)	
	二次	kV 6.9	
	二次	kV 6.9	
相	-	3	
周波数	Hz	50	
結線法	一次	-	三角形
	二次	-	星形
	二次	-	星形
冷却法	-	油入風冷式	

(その他)絶縁油関係

絶縁油量	17200 ㍓
絶縁油種類	7種4号 (JIS C 2320)
引火点	130 以上
発火点	250 以上 (参考)

通常油温：外気温 + 約 20 ~ 30 程度

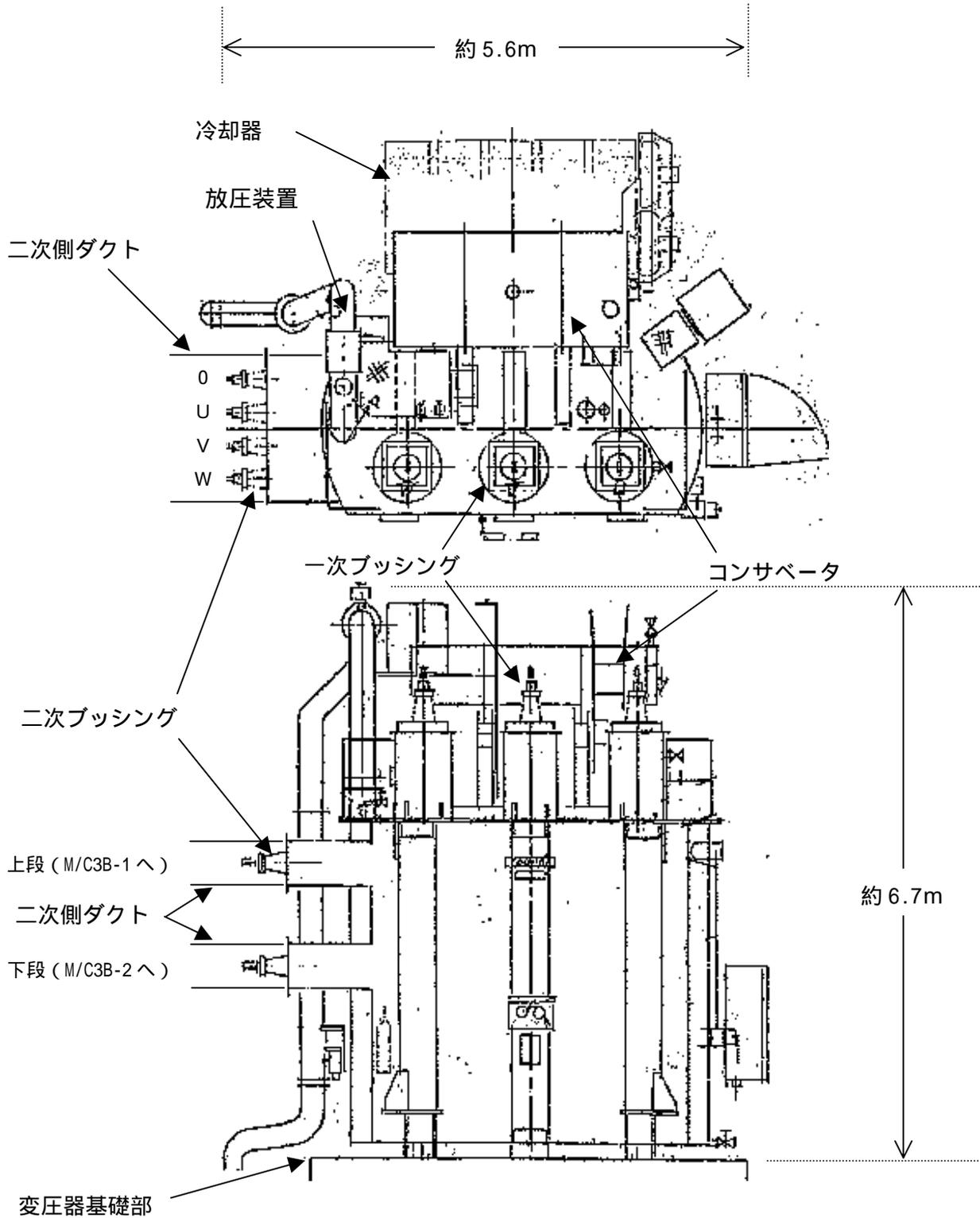


柏崎刈羽原子力発電所 3号機 単線結線図

所内変圧器3B火災発生に至る事象の要因分析表

最終現象	一次現象	想定される部位	原因事象	調査項目	結果	評価	
地震時に所内変圧器3Bで火災発生	漏油	a:タンク溶接部	a:溶接部破断	漏油/変形/破損	異常なし	×	
		b:二次ブッシング取り付け部	a:取り付け部口開き	漏油/口開	異常なし	×	
		c:二次ブッシング	a:碍管破損	破損/端子外れ/溶損	・全て(上下段合わせて8本(含む中性点))の碍管に割れあり ・特に上段のW相、下段のW相)は中心導体が一部見える状態であり、火災鎮火後も漏油が継続 ・上記以外のブッシングも碍管が割れていることから漏油していた可能性あり		
			d:一次ブッシング取り付け部	a:取り付け部口開き	漏油/口開	異常なし	×
		e:一次ブッシング	a:碍管破損	破損/端子外れ/溶損	異常なし	×	
		f:油配管	a:フランジ口開き	漏油/口開	異常なし	×	
			b:溶接部破断	漏油/変形/破損	異常なし	×	
		g:放圧装置	a:放圧装置動作	漏油/動作状況	・安全ピンは破断し動作、放圧板にしわがあるが破れていない(放圧板は開放していない) ・外部からの油煙により表面が茶色に着色(油の流出なし)	×	
		h:冷却器	a:腐食、ガスケット劣化など	漏油/溶接部亀裂/変形	異常なし	×	
		i:コンサバータ	a:腐食、ガスケット劣化など	漏油/溶接部亀裂/変形	異常なし	×	
		k:付属品取り付け部	a:腐食、ガスケット劣化など	漏油/破損	以下の破損等が確認されたが、火災発生付近への漏油はなし。 ・二次側接続母線部上段ブッシング変圧器端子箱焼損 ・测温抵抗端子箱黒色化 ・吸湿呼吸器オイルカップ破損	×	
		放電	a:二次側接続母線部導体	a:地絡/短絡故障	位置確認(寸法測定) 溶損(放電)状況	二次側接続母線部ダクトが変圧器本体に対し下がっている(ダクトの変位は上段180mm、下段160mm) 上段、下段ともに、二次ブッシングに取り付けた導体(端子部を含む)、ダクト内壁(上面、側面)で溶損(火災による損傷がかなり過酷なため、放電による損傷との区別が難しい状況)	
			b:二次ブッシング	a:端子外れ放電	破損/端子外れ/溶損 溶損(放電)状況	以下の損傷等が確認されたが、ブッシング端子部分の接続外れはなし。 上段、下段ともに、二次ブッシングに取り付けた導体(端子部を含む)、ダクト内壁(上面、側面)で溶損(火災による損傷がかなり過酷なため、放電による損傷との区別が難しい状況)	×
	b:碍管破損地絡			破損/溶損	以下の破損等が確認されたが、地絡短絡の痕跡はなし。 ・全て(上下段合わせて8本(含む中性点))の碍管に割れあり ・特に上段のW相、下段のW相は中心導体が一部見える状態であり、火災鎮火後も漏油が継続 ・上記以外のブッシングも碍管が割れていることから漏油していた可能性あり	×	
	c:一次側接続端子部導体		a:地絡故障	地絡/変形/変位	異常なし(W相は外部の火災であぶられてブーツ破損)	×	
	d:一次ブッシング		a:端子外れ放電	破損/端子外れ/溶損	異常なし	×	
			b:碍管破損地絡	破損/溶損	異常なし	×	
	e:内部リード	a:地絡/短絡故障	リード接続部の確認 絶縁油油中ガス分析	異常なし(燃焼によるすす、炭化した絶縁油などの直接的な火災の痕跡なし)	×		

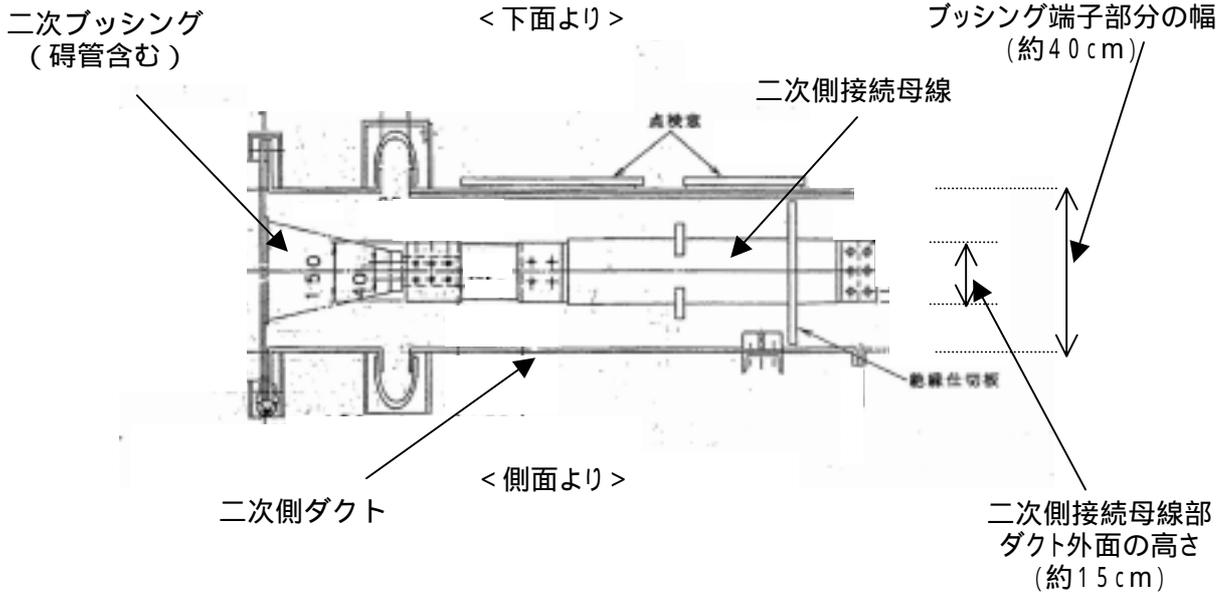
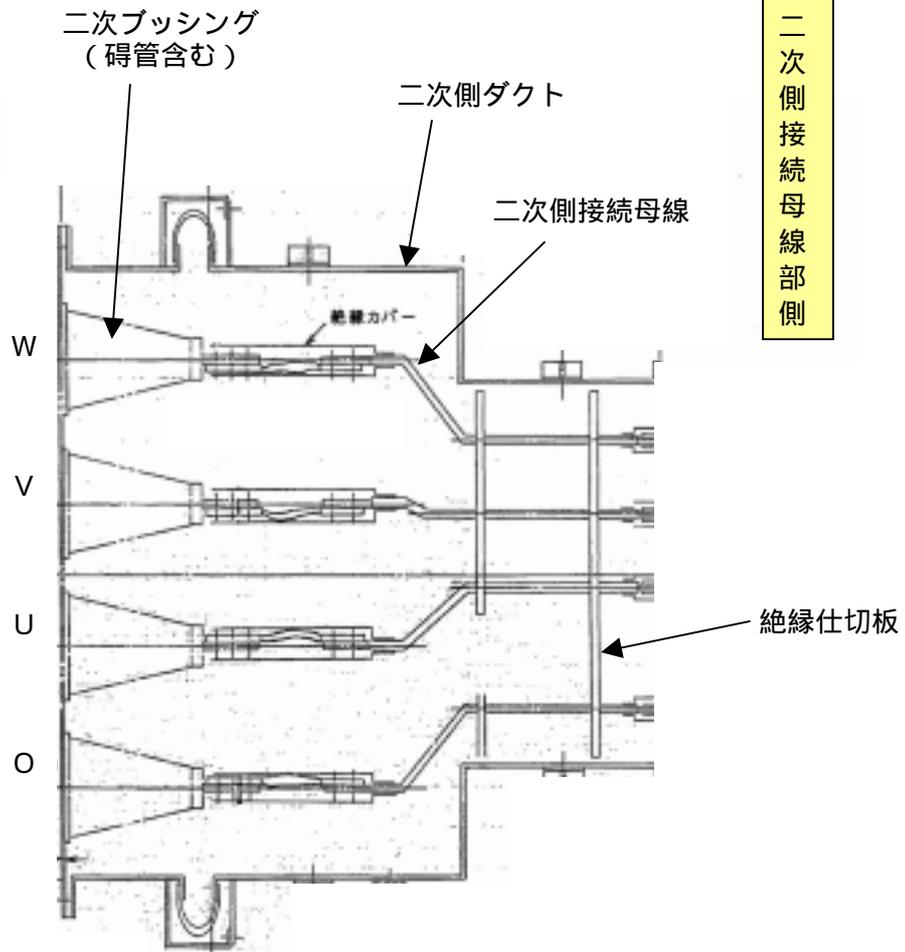
と の両者がともに発生して火災発生となりうる



所内変圧器3B 外形図

変圧器側

二次側接続母線部側



二次側接続母線部の構造図

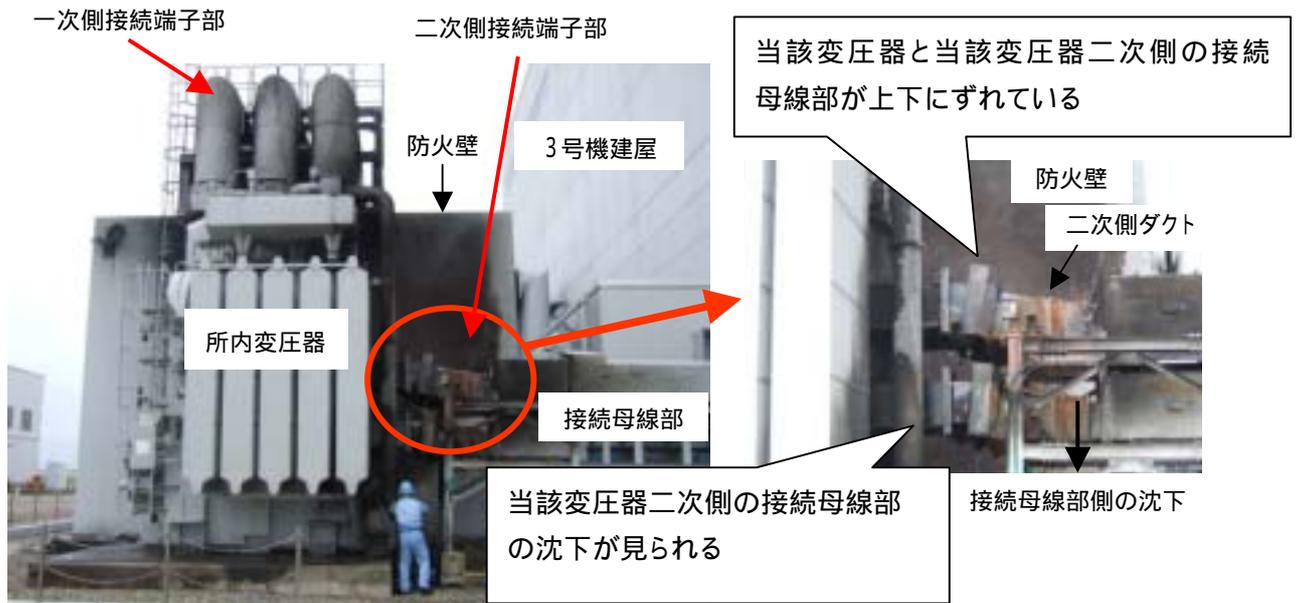


写真1 外観 / 二次側接続母線部損傷状況(冷却器側)



写真2 二次ブッシング碍管破損(下段)

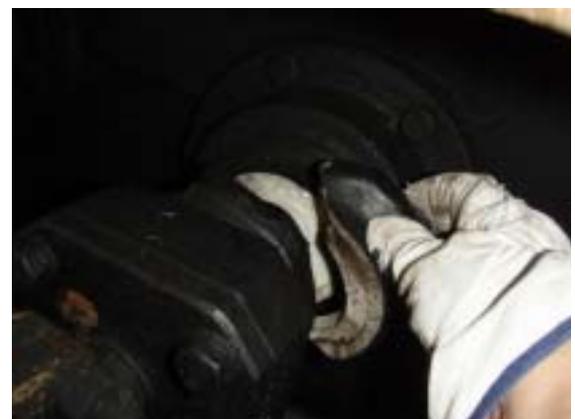


写真3 二次ブッシング碍管のひび割れ(容易に剥がれる) (上段V相)

所内変圧器3B 外観調査結果(1/4)

U.V.W 相とも
ダクトが接触した
ものと推定される



碍管破損箇所
からの漏油(W相)

写真4 二次ブッシング碍管破損と漏油(下段)



(上段)

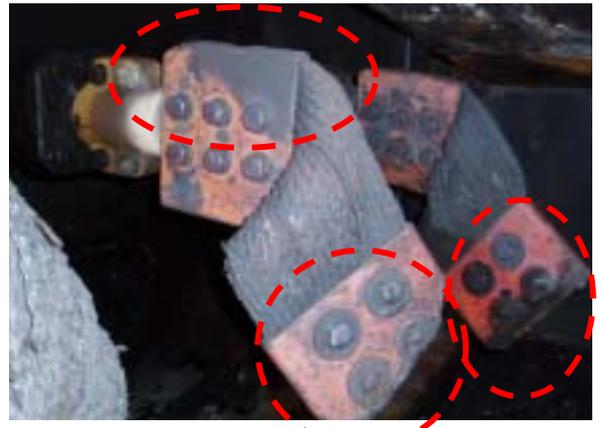


(下段)

写真5 二次側接続母線部ダクト上面溶損穴



(上段)



(下段)

写真6 二次側接続母線部の導体溶損



ダクト側壁に
穴あり

写真7 二次側接続母線部損傷状況(防火壁側)

所内変圧器3B 外観調査結果(3 / 4)



写真8 基礎ボルト頭部曲がりあり



写真9, 10 放圧装置(安全ピンは破断し動作。放圧板にしわがあるが破れていない)

所内変圧器3B 外観調査結果(4 / 4)

所内変圧器 3 B 油中ガス分析結果

目的

絶縁油中に含まれる可燃性ガスの種類，組成を分析することにより，変圧器内部での異常の有無を診断する。

方法

石油学会規格 JPI-5R-51-98 『油入電気機器からのガス及び絶縁油の採取と遊離及び溶存ガス分析方法』による。

結果

(単位：ppm)

測定年月日	可燃性 ガス 総量	水素 H ₂	メタン CH ₄	エタン C ₂ H ₆	エチレン C ₂ H ₄	アセチレン C ₂ H ₂	一酸化炭素 CO
2007年6月27日 (地震発生前：定例分析)	158	8	21	44	1	検出限界 以下	84
2007年7月23日 (地震発生效后)	369	35	95	88	53	0.76	97

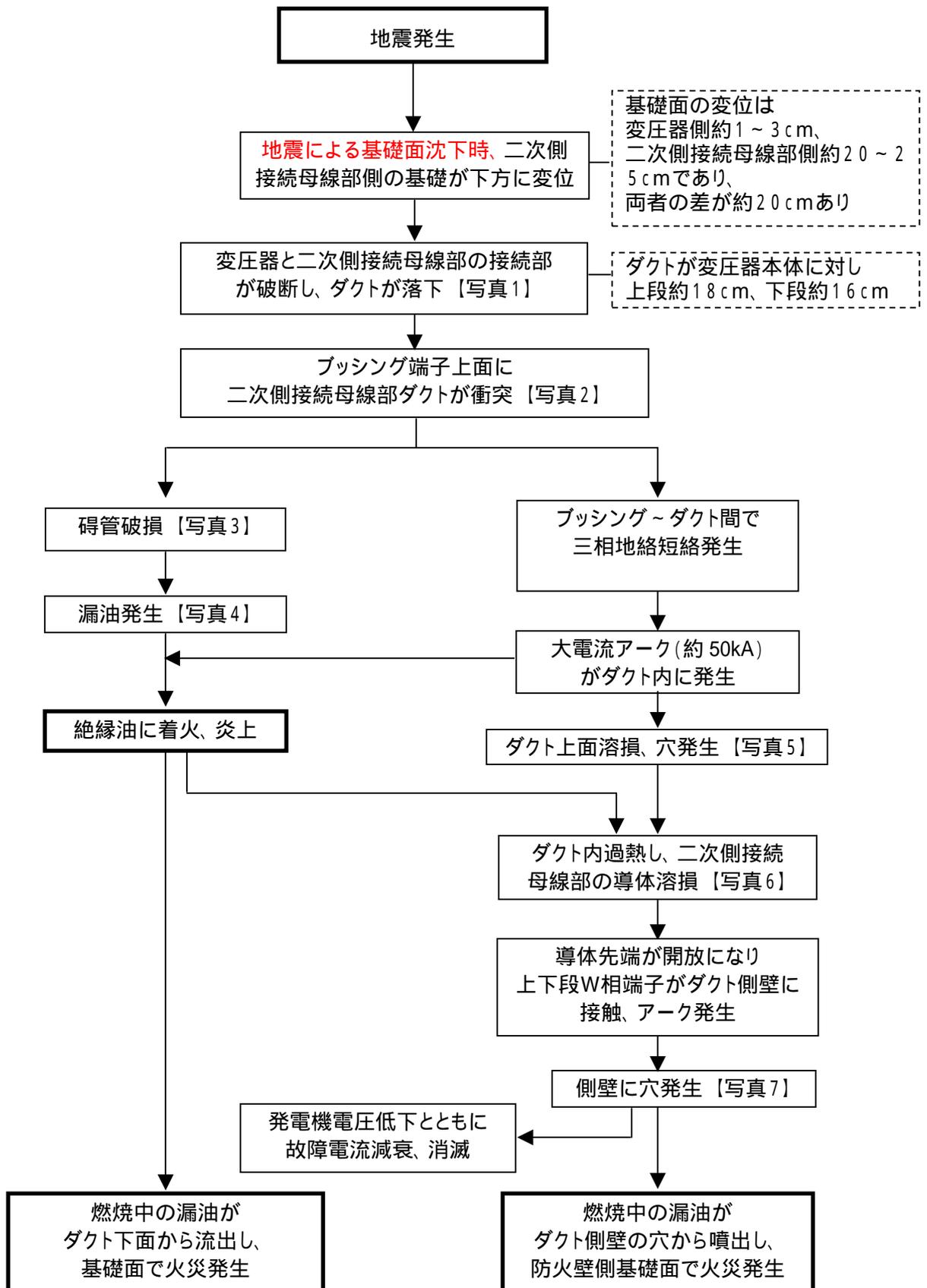
【考察】

地震発生前後で，放電現象の特徴的なガスである C₂H₂ が発生しているが，放電などの内部故障があった場合に通常発生する量と比較して僅か*であることが確認された。また，可燃性ガス総量が約 2.3 倍増加しているが，特に過熱の特徴的なガスである C₂H₄，CH₄ の増加が顕著であった。

以上の結果から，二次側接続母線部での火災により高温過熱を受け一部絶縁油が分解し可燃性ガスを生成したものであり，変圧器内部での異常（放電，過熱）を示すものではないと推測される。

*：放電があるとほとんどの場合 10ppm 以上測定される。

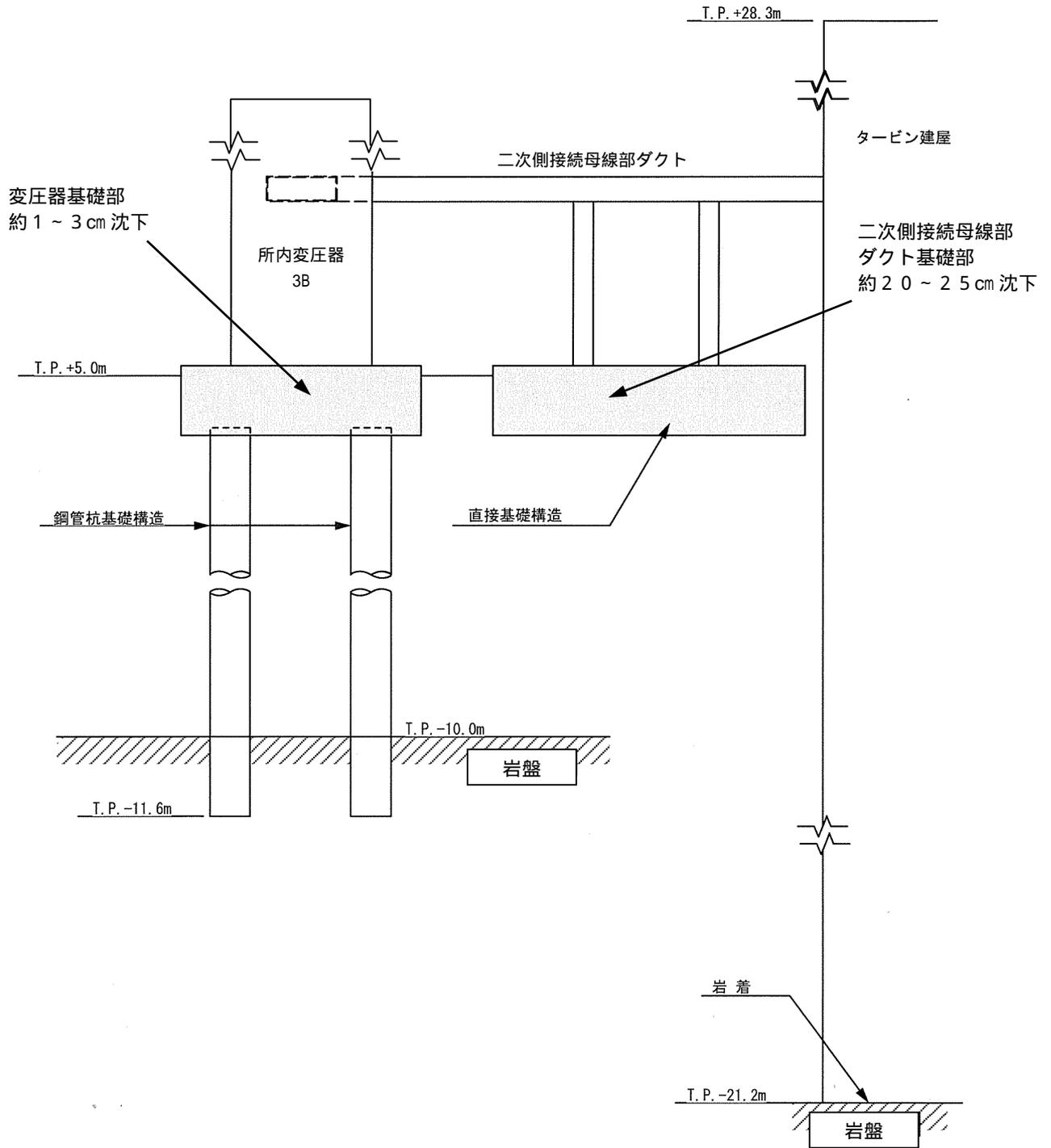
以上



地震発生から火災発生に至るフロー(調査結果からの推定)

(注)写真は添付資料 - 5参照。

所内変圧器周辺基礎構造概念図



T.P. : 東京湾中等潮位

放電発生状況の調査結果

1. 目的

要因分析表に基づく調査結果より、二次側接続母線部導体からの放電が推定されたことから、この放電が発生した状況について、警報やプラントデータより、放電発生の時期について評価する。

2. 調査方法

(1) 警報出力表(アラームタイパ)による調査

所内変圧器に関連する警報の発生実績を確認し、発電機トリップ前に所内変圧器内部の異常を示す警報が発生していないことを確認する。

(2) 発電機トリップに関する調査

発電機トリップに関する警報を調査し、発電機トリップ前に所内変圧器内部の異常を示す警報が発生していないことを確認する。

(3) 発電機関連のパラメータに関する調査

データ記録装置に記録された発電機関連のパラメータの挙動を確認し、放電発生の時期について確認する。

3. 調査結果

(1) 警報出力表(アラームタイパ)による調査結果

地震発生時に油面の変動により油面低が発生し、その後 30 分で本体ガス検出、更に、19 分後にコンサベータガス検出しているが、直接地絡に結びつく警報の発生はなく、変圧器、接続母線部の短絡事象は発生していなかったと考えられる。なお、本体及びコンサベータのガス検出は火災の影響で発生したものと推測される。(添付1)

(2) 発電機トリップに関する調査結果

発電機トリップの要因を示す警報には所内変圧器に関するものはなく、発電機トリップ時には変圧器、接続母線部の短絡事象は発生していなかったと考えられる。(添付2)

(3) 発電機関連のパラメータに関する調査結果

発電機関連のパラメータより、タービントリップにより発電機回路ロックアウト(86G)が動作し、86G動作により、発電機遮断器(52G)及び界磁遮断器(41G)が開放されると同時に所内切り替えが行われた。この時点では発電機電流は減少しており、所内変圧器、二次側接続母線部での短絡故障は発生していないと考えられる。発電機回路ロックアウト(86G動作)後一旦ゼロになっていた発電機回路の電流が、約1.6秒後に約18.6kAに急上昇し約6秒かけて減衰するとともに、発電機電圧が約17.2kVから約13.2kVに急激に低下する現象が記録されている。

これは、タービントリップを受け発電機ロックアウトリレー動作後に発電機遮断器及び界磁遮断器が開放されると同時に所内切り替えが行われたが、慣性による発電機の回転と発電機内に残留している磁界によって発生した発電機電圧が低下する途中で、回路において何らかの短絡現象が発生したと考えられる。(添付3)

4.まとめ

警報の発生状況および発電機回路の電圧電流の記録より、86G動作から約1.6秒後に発電機電流の急上昇と電圧の急減が起こっていることから、この時点で短絡故障が発生したものと考えられる。この変化は三相とも同時にかつ同一レベルで発生しており、最終的には三相地絡・短絡故障が発生したものと推定される。

以上

(1) 警報出力表(アラームタイプ)による調査

【調査結果】

所内変圧器関係ログ出力より、所内変圧器3Bの警報は以下のとおり。

-10時13分

所内変圧器3B 油面低

-10時43分

所内変圧器3B 本体ガス検出

所内変圧器3B 故障 (上記警報発生による集合警報)

-10時45分

所内変圧器3B 故障 (復帰)

-10時46分

所内変圧器3B 故障 (動作)

* 集合警報が、一度復帰し、その後、再動作。

-11時02分

所内変圧器3B コンサベータガス検出

-11時14分

所内変圧器3B 直流警報電源喪失

所内変圧器3B 油面低 (復帰 *)

所内変圧器3B 本体ガス検出 (復帰 *)

所内変圧器3B コンサベータガス検出 (復帰 *)

* 直流警報電源喪失により、補助リレーが無励磁となり、警報復帰したものとする。

【考察】

地震発生時に油面の変動により油面低が発生し、その後30分で本体ガス検出、更に、19分後にコンサベータガス検出している。本体及びコンサベータのガス検出は火災の影響で発生したものと推測される。

(2) 発電機トリップに関する調査結果

【調査結果】

トリップシーケンスログデータを確認した結果、所内変圧器3B については、トリップシーケンス関係の打出しはなかった。

また、プラントトリップ信号に係る打ち出し信号を確認した結果、原子炉スクラムから所内切替までの一連のイベントが10時13分に一斉に行われており、発電機ロックアウト(86G)動作は、タービントリップによるもので、発電機遮断器(O23)及び界磁遮断器のトリップが実施され、所内切替が行われていることから、設計通りのインターロックが働いたと考えられる。

(原子炉スクラム)

10時13分 27.63秒 R/B 下部鉛直方向地震加速度大

同上 27.65秒 原子炉スクラム

(タービントリップ)

10時13分 34.28秒 タービン スラスト軸受け磨耗大

同上 34.33秒 タービントリップ(時刻はマスターソレノイド作動完了時間)

(発電機トリップ)

10時13分 34.64秒 タービントリップと発電機遮断器(O23)の AND 条件で成立

同上 34.67～34.68秒 発電機 ロックアウトリレー (86G1, 86G2)動作

86G 動作後は、発電機遮断器 トリップ(O23)(34.68秒)、界磁遮断器トリップ(34.71秒)及び所内切替(所変 起変)(時間記録なし)

【考察】

変圧器及び接続母線部の地絡及び短絡事故時に動作する保護リレーは以下である。

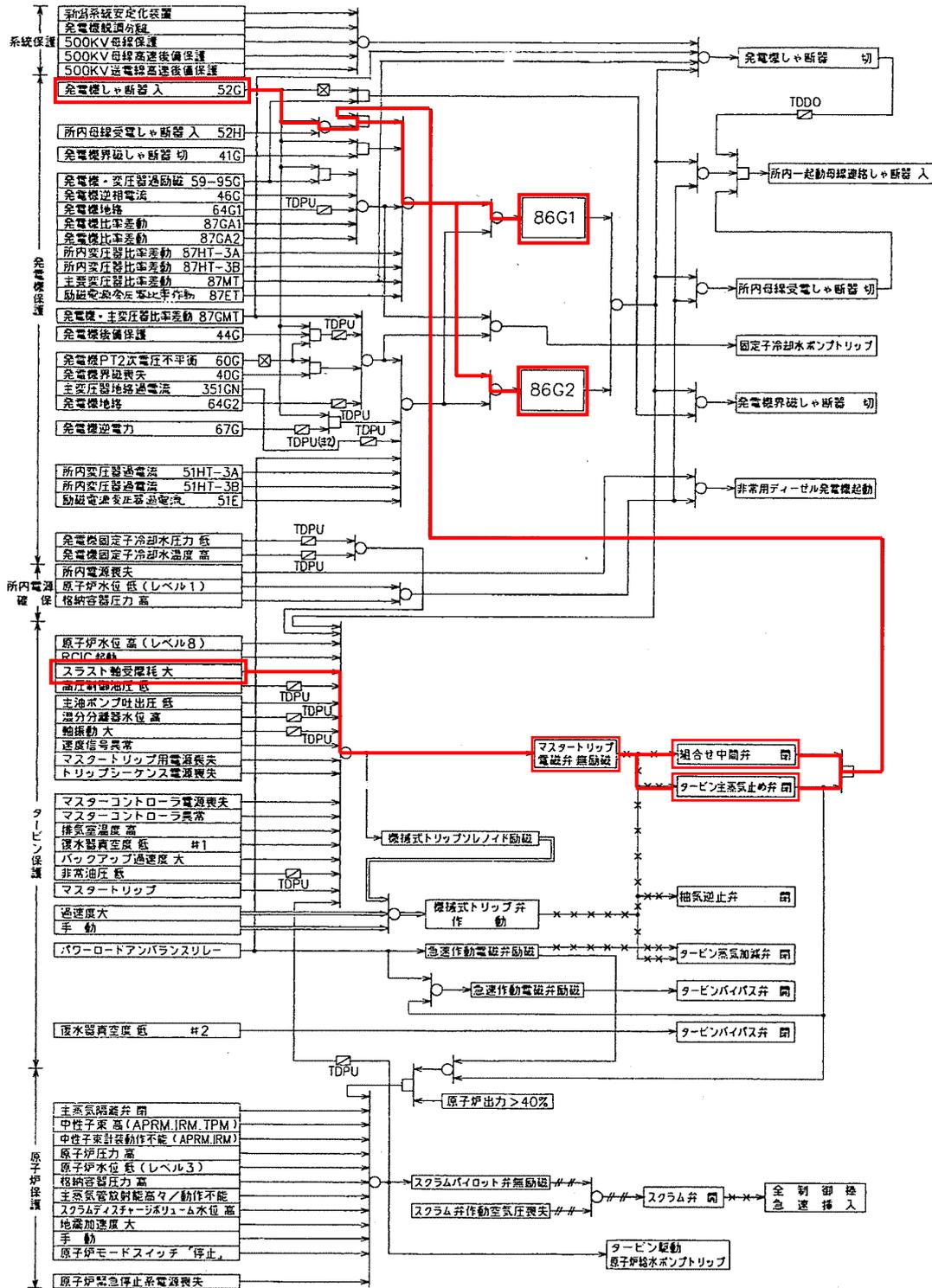
< ケース1 > 変圧器 1 次側の短絡故障の場合

- 所内変圧器比率差動(87HT-3B)
- 所内変圧器過電流 (51HT-3B)
- 発電機地絡 (64G1、2)

< ケース2 > 変圧器 2 次側の短絡故障の場合

- 所内変圧器比率差動(87HT-3B)
- 所内変圧器過電流 (51HT-3B)
- 所内変圧器地絡(64HT - 3B)

上記リレーは発電機ロックアウトリレー 86G に入力されている。86G 回路は 86G 動作で検出回路をクローズし、ファーストヒットのリレーのターゲットが残る設計となっている。今回のトリップログには、86G 動作の要因として上記のリレー動作を示す信号が中操警報に出力されていないので、86G 動作時には変圧器、接続母線部の短絡事象は発生していなかったと考えられる。



注記：
 1. 記号の意味は次の通り。
 ○ : OR回路
 □ : AND回路
 ⊖ : NOT回路
 ⊞ : 時間回路
 TDPU : 限時作動/限時復帰
 TDDO : 限時作動/限時復帰
 → : 電気信号
 ⇨ : 機械設備
 ⇨⇨ : 油圧又は水圧信号
 ⇨⇨⇨ : 空気信号
 ⇨⇨⇨⇨ : リー物/限時復帰

【 プラントインターロック図 】

(3) 発電機関連のパラメータに関する調査結果

【調査結果】

データ記録装置に記録された発電機出力、発電機電圧、発電機電流についての挙動は以下のとおり。

項目	単位	スクラム 信号発生時	86G 動作 (52G 遮断 前)	52G 遮断 直後	52G 遮断 1.5 秒後 (短絡直 前)	52G 遮断 1.6 秒後 (短絡電流 ピーク)	52G 遮断 7.6 秒後 (短絡電流 ゼロ)
1 発電機出力	MWe	1,114	697	389	0	16	0
2 発電機 電流	R 相 kA	35.0	22.7	11.9	0	18.6	0
3	S 相 kA	35.0	22.7	11.9	0	18.6	0
4	T 相 kA	35.0	22.7	11.9	0	18.6	0
5 発電機 電圧	R 相 kV	19.3	20.1	22.9	17.2	13.2	3.4
6	S 相 kV	19.3	20.1	22.9	17.2	13.2	3.4
7	T 相 kV	19.2	20.1	22.9	17.2	13.2	3.4

発電機電流と発電機電圧については、以下のように評価される。

発電機電流

86G 動作後、発電機電流は減衰しているが、発電機遮断器(52G)が開となってから約 1.6 秒後に電流が急激に立ち上がっている(18.6kA*)。3相共に同じ電流であり、3相短絡事故が発生したと考えられる。この電流がゼロとなるまでの時間は約 6 秒間である。

* 所内変圧器の 2 次側換算で、約 51 kA (=18.6kA * (18.988kV / 6.9kV))

* この電流源は、発電機の残留電圧により発生した電流である。

発電機電圧

86G 動作で発電機遮断器(52G)がトリップすると発電機電圧は一時的に急上昇(20.1kV 22.9kV)するがその後、減少していく。約 1.6 秒後に、所内変圧器、二次側接続母線部で短絡事故が発生し、電圧は 17.2kV から、13.2 kV に低下していた。

【考察】

発電機関連のパラメータより、タービントリップにより発電機回路ロックアウト(86G)が動作し、86G 動作により、発電機遮断器(52G)及び界磁遮断器(41G)が開放されると同時に所内切り替えが行われた。この時点では発電機電流は減少しており、所内変圧器、二次側接続母線部での短絡故障は発生していないと考えられる。

その後、発電機回路ロックアウト(86G 動作)後一旦ゼロになっていた発電機回路の電流が、約 1.6 秒後に約 18.6kA に急上昇し約 6 秒かけて減衰するとともに、発電機電

圧が約 17.2kV から約 13.2kV に急激に低下する現象が記録されている。

これは、タービントリップを受け発電機回路ロックアウトリレー動作後に発電機遮断器及び界磁遮断器が開放されると同時に所内切り替えが行われたが、慣性による発電機の回転と発電機内に残留している磁界によって発電機に残留電圧があり、(残留界磁の減少および変圧器励磁電流として消費されることにより) その電圧が徐々に低下する途中で、回路において何らかの短絡現象が発生したと考えられる。

この変化は三相とも同時にかつ同一レベルで発生しており、最終的には三相地絡・短絡故障が発生したものと推定される。また、変圧器 2 次側端子部において、3 相短絡事故が発生したものと考え、電流がゼロとなるまでの時間は約 6 秒間であった。

以上