

地震発生からブラックアウトに至るまでの 事象について（前回指摘事項等）

2018年10月9日

第1回検証委員会において、地震発生からブラックアウトまでの事象について概ね明らかとなった。当資料では前回継続検討としていた事象や、ご意見のあった事象等について調査を行い、以下のとおり調査結果をまとめた。

【ガバナフリー量・A F C量の推移について】（3～9スライド）

- A F C対象の発電機はどこか
- ガバナフリー容量はどの程度であったか
- 奈井江1号の増出力が遅かったのはなぜか

【道東エリアの状況について】（10～15スライド）

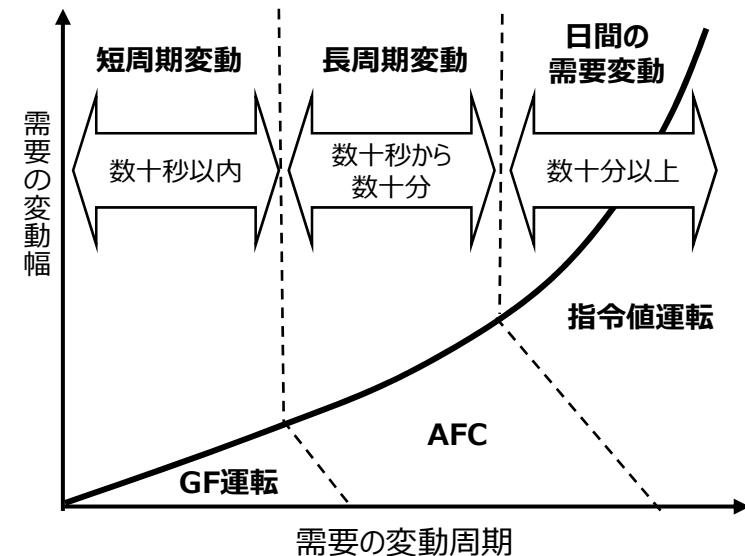
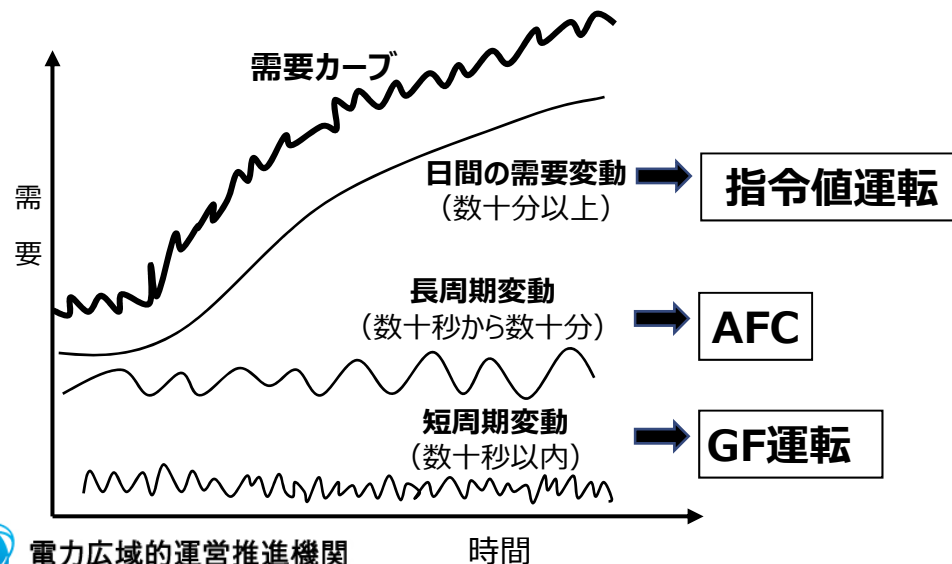
- 送電線3ルート事故は同時に発生したのか
- 送電線の事故原因は何か

【系統電圧の推移について】（16～19スライド）

- 全体的に電圧が高めに推移している原因は何か
- 3時18分以降電圧が低下した理由は何か

- 苫東厚真2・4号の停止による周波数低下後、北本連系設備からの緊急融通や負荷遮断等により、一旦周波数が50Hz程度でバランスしているが、その後安定を保つことが出来なかった。
- この原因は、地震後の需要増加以外に、前回の検証における議論にあったように、ガバナフリー（GF）量やAFC量が不足していたことが考えられることから、地震前後のGF量およびAFC量について調査を行った。
- 結果としては、地震直後にGF量は一部残っていたものの、AFC量は水力の停止等によりゼロとなったことが判明した。
- AFC量がゼロとなったことにより、周波数を安定的に保つことが困難となった。

- 発電機出力調整は、短～長周期の需要変動に対してはGF運転、AFCを組み合わせ実施している。一方、数十分以上にわたる周期の需要変動に対しては、経済性や安定供給を考慮した中央給電指令所（中給）からの指令値に合わせて発電機出力を調整すること（指令値運転）により対応する。
- **GF運転とは、**
 - ・ 需要の変動のいかんにかかわらず、**発電機の回転速度を一定の回転速度を保つように、動力である蒸気および水量を現地で自動的に調整し、系統周波数の変化に追従して出力を増減させる**運転をいう。
- **AFC (Automatic Frequency Control) とは、**
 - ・ 周波数を一定に保つために、**時々刻々と変化する電力需要に合わせて、発電所の出力を中給の給電システムが自動的に制御**することをいう。



2. ガバナフリー量・AFC量の推移について＜地震直前＞

5

- 北海道電力は、日常的な確保量として
 - ・ GF量はエリア需要（送電端）の2%（主に火力で確保）
 - ・ AFC量はエリア需要（送電端）の2%（水力で確保）
 を確保することとしている。
- 地震直前のGF量・AFC量は下表のとおりであり、上述の日常的な確保量を満たしていた。

＜主なGF量※1：火力＞

	上限 (MW)	出力 (MW)	GF量 (MW)	備 考
奈井江1号	175	61	—	指令値運転
知内1号	350	96	35	GF+ 指令値運転
伊達2号	350	76	—	指令値運転
苫東厚真1号	350	338	10.5	GF+ 指令値運転
〃 2号	600	556	44	GF+ 指令値運転
〃 4号	700	598	—	指令値運転
合 計	2700	1725	89.5	
エリア需要 比率	—	—	約2.9%	エリア需要 3087MW※2

＜AFC量：水力＞

	上限 (MW)	出力 (MW)	上げ余力 (MW)	備 考
下新冠	13	10	3	・左記以外の 運転中水力 は、電圧調 整や台風一 過後の溢水 防止などの ため、出力一 定で発電し ていた。
静内1号	23	20	3	
〃 2号	23.7	20	4	
高見	98	25	73	
大雪	15	15	0	
合 計	172.7	90	83	
エリア需要 比率	—	—	約2.7%	エリア需要 3087MW

2. ガバナフリー量・AFC量の推移について＜地震直後＞

6

- 地震により、主要な発電機が停止したため、
 - ・ GF運転の発電機は、不安定な知内1号、苫東厚真1号および一部の水力となった。
 - ・ AFC対象の発電機は、余力「ゼロ」となり調整力がなくなった。
- このため、1回目の負荷遮断後に北本連系設備のAFC余力がなくなると、周波数を安定的に保つことが困難となった。

＜GF量：主に火力＞

	上限 (MW)	出力 (MW)	GF量 (MW)	備 考
奈井江1号	175	58	－	発電機不安定
知内1号	350	103	(35)	
伊達2号	350	76	－	
苫東厚真1号	350	294 (推定)	(10.5)	
〃 2号	600	0	－	発電機停止
〃 4号	700	0	－	
合 計	2700	531	(45.5)	
エリア需要 比率	－	－	(2.5%)	エリア需要推定 1800MW※

＜AFC量：主に水力＞

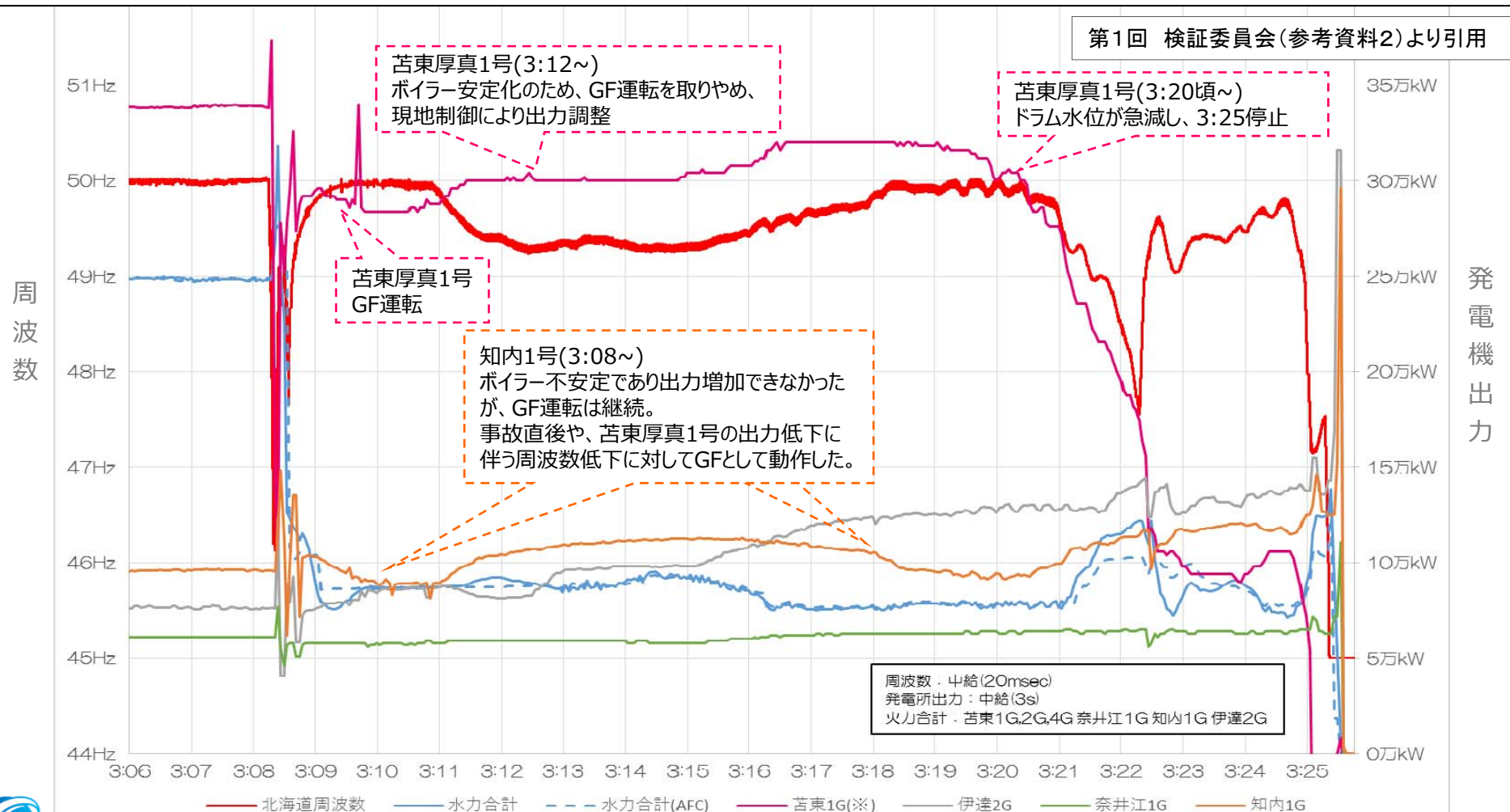
	上限 (MW)	出力 (MW)	上げ余力 (MW)	備 考
下新冠	13	0	－	発電機停止
静内1号	23	0	－	
〃 2号	23.7	0	－	
高見	98	0	－	
大雪	15	0	0	発電機出力低下
合 計	172.7	0	0	
エリア需要 比率	－	－	0%	エリア需要推定 1800MW※

※ 事前3087MW－負荷遮断（1300MW）から推定

2. ガバナフリー量・AFC量の推移について＜GF運転火力の状況＞

7

- GF運転の発電機出力について、
 - ・ 苫東1号は出力が急変してボイラーが不安定であったことから、3:12からGF運転を取りやめた。
 - ・ 知内1号はボイラー不安定であり出力増加はできなかったが、出力維持でGF運転を継続した。
- その結果、知内1Gは概ね周波数の変化に応じて動作(GFとして動作)したと考えられる。

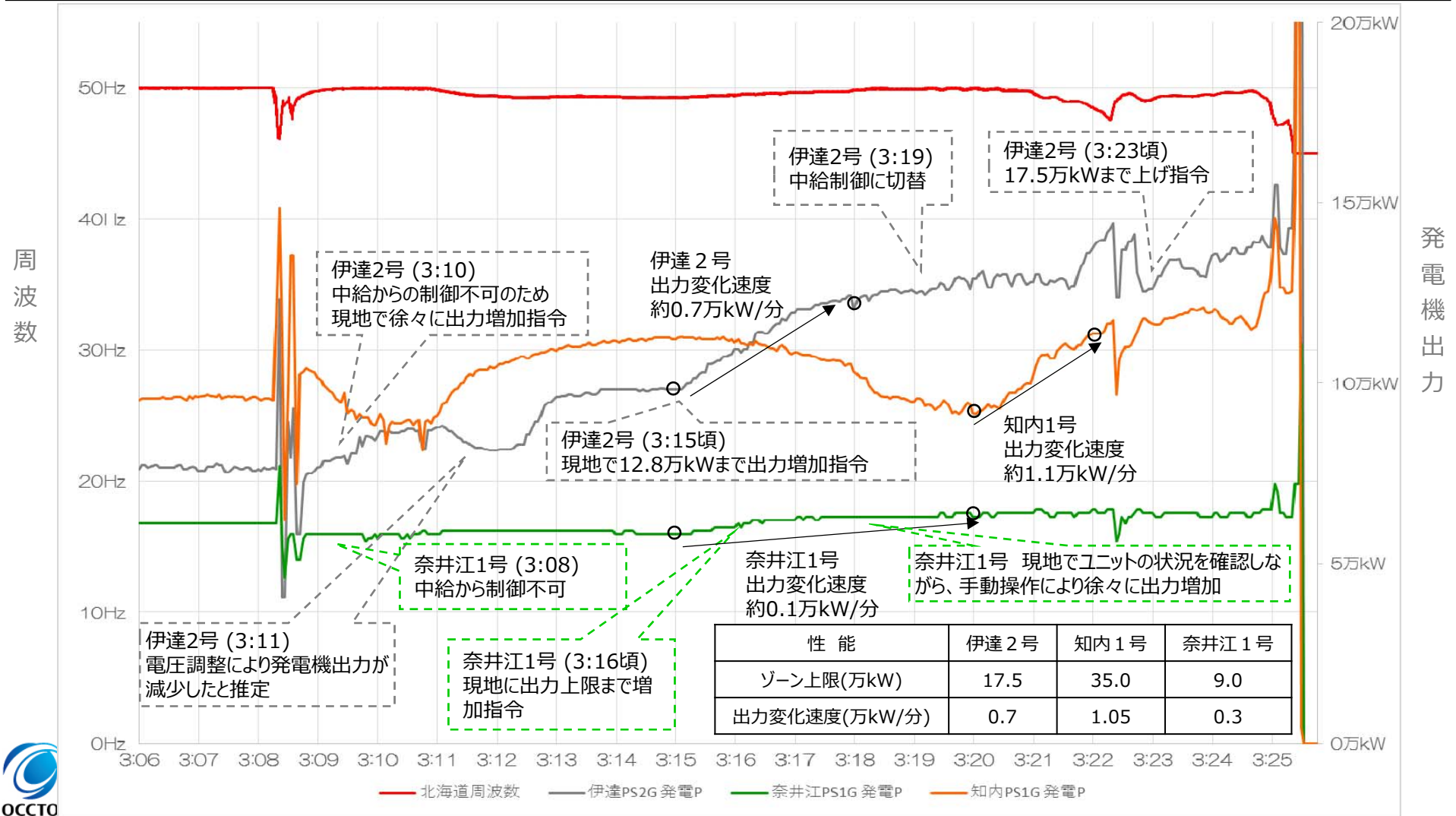


※ 3時8分より苫東1Gの発電端出力と送電線潮流(南早来線+苫東厚真線)の値が2倍程度乖離しており、当該発電機の計測異常が疑われるため、送電線潮流値を採用

2. ガバナフリー量・AFC量の推移について<その他火力の状況>

8

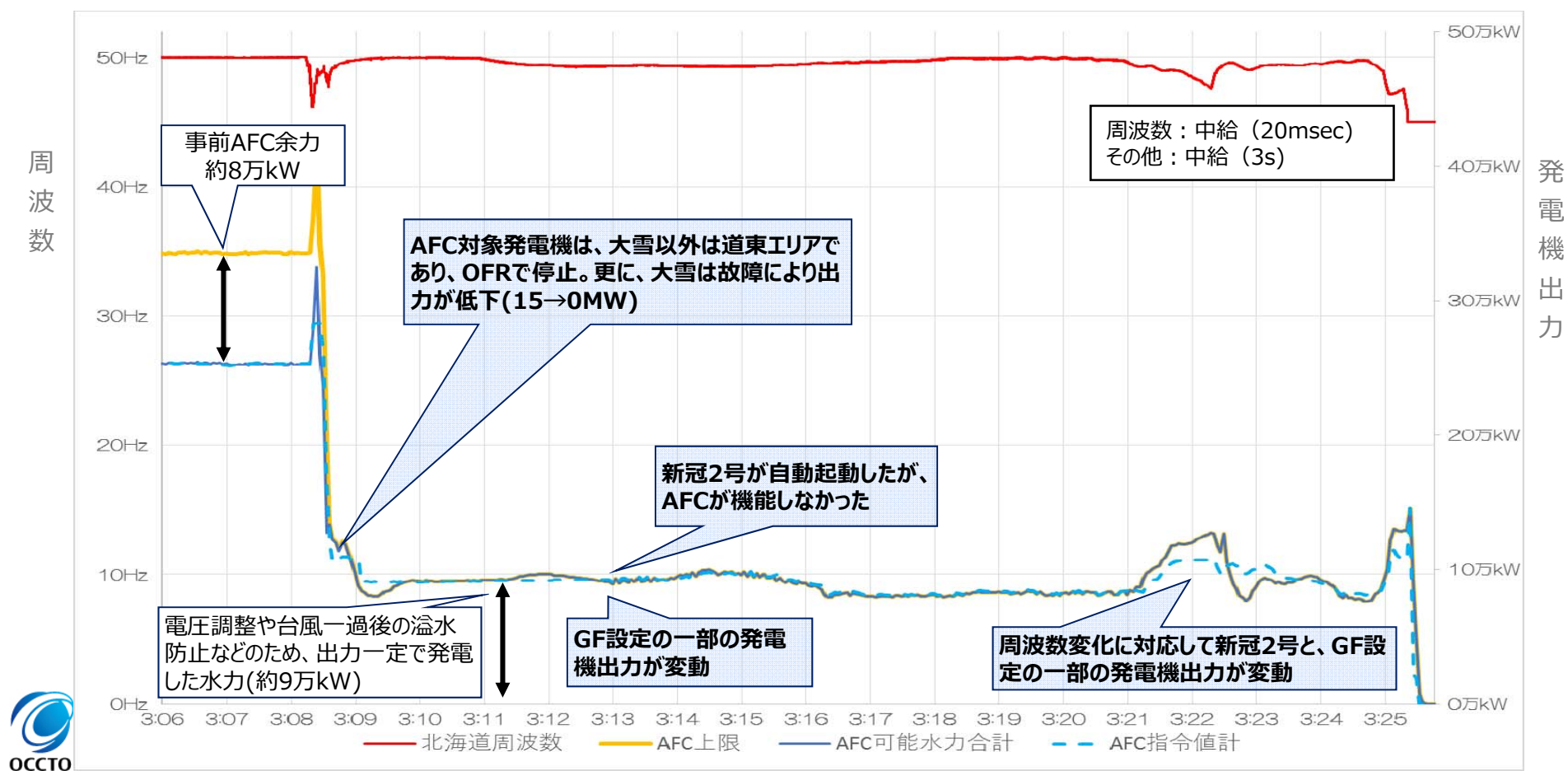
- 地震発生後のガバナフリー運転以外の火力の状況は以下のとおり。
- 伊達2号は、中給と現地で状況を確認しながら、順次、出力増加させた。
- 奈井江1号は、中給からの制御ができなかったため、現地に上げ指令を行い、現地でユニットの状況を確認しながら、手動操作により徐々に出力を増加させたため、出力変化速度が遅くなった。



2. ガバナフリー量・AFC量の推移について＜水力の状況＞

9

- 地震発生後のAFC対象水力の動きは以下のとおりで、すみやかな増出力が行えなかった。
- 事前に確保していたAFC量(8万kW)は、地震後には「ゼロ」になった。
- 周波数低下に伴い、バランス停止中を含む稼働可能な水力に対して、中給から各系統制御所に自動的に「49.5Hz以下で増発、49.0Hz以下で起動」の自主操作指令が出ていたが、周波数が回復すると、自動的に指令が解除された。
- 新冠2号は自動起動したが、道東エリアの停電の影響で必要な情報が欠落したため、AFCが機能しなかった。



- 第1回検証委員会において、狩勝幹線、新得追分線、日高幹線の地絡事故により、道東エリア及び北見エリアが停電し、水力が停止したことを確認した。
- 一方、ほぼ同時刻に上記 3 線路で地絡事故が本当に発生したのか、発生したのであればその発生原因は何かについては、継続調査することとなった。
- 今回、上記 3 線路の巡視点検結果やオシログラフの記録等から、地震の揺れにより実際に地絡事故が発生し、道東エリア等が停電したことが判明した。
- 合わせて道東エリア等の水力の停止原因も判明した。

3. 道東エリアの状況

11

- 道東エリア単独に至る送電線事故（4回線）の概要は以下のとおりで、中給やオシログラフの記録、アーク痕などから各送電線で地絡事故があったと考えられる。（約1分後に再閉路成功）

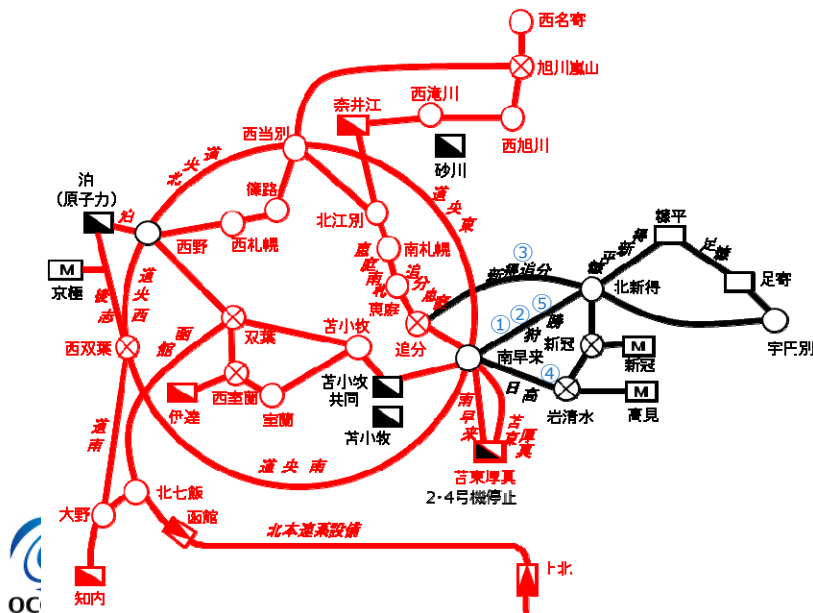
回線※1 (事故順)	事故		
	時間※3	様相	鉄塔No.
①狩勝幹線 1 L	3:08:17	1相地絡	No.26
②狩勝幹線 2 L ※2	3:08:17	1相地絡	No.29
③新得追分線 2 L	3:08:19	2相地絡	No.409
④日高幹線	3:08:21	1相地絡	No.135
⑤狩勝幹線 2 L	3:08:25	1相地絡	No.20

※1 新得追分線 1 L は作業停止中

※2 高速再閉路「良」(0.6秒で再閉路)

※3 オシログラフ (GPS時刻同期付) にて確認

(ただし、日高幹線はGPS機能付ではないため中給の記録)



- 巡視の結果、全ての回線においてアーク痕が確認されており、その原因はジャンパー線と架線金物の接近による地絡事故と考えられる。

<代表例：狩勝幹線 2 L 1 相地絡事故>

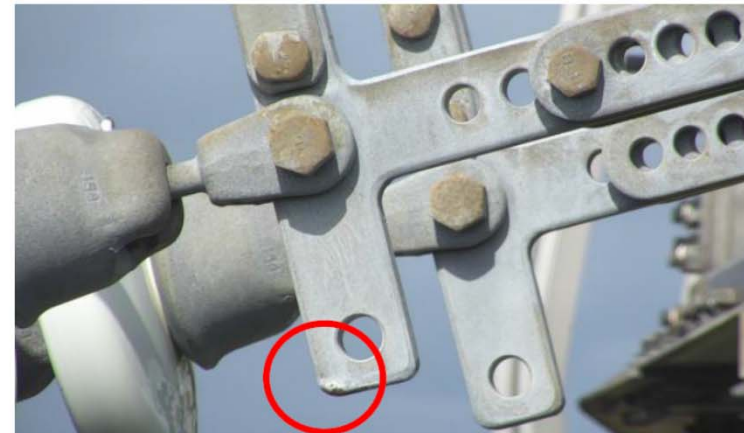
【事故箇所】No.29鉄塔 青相（上線） ジャンパー線と架線金物にアーク痕あり



① ジャンパー線



② 架線金物



3. 道東エリアの状況

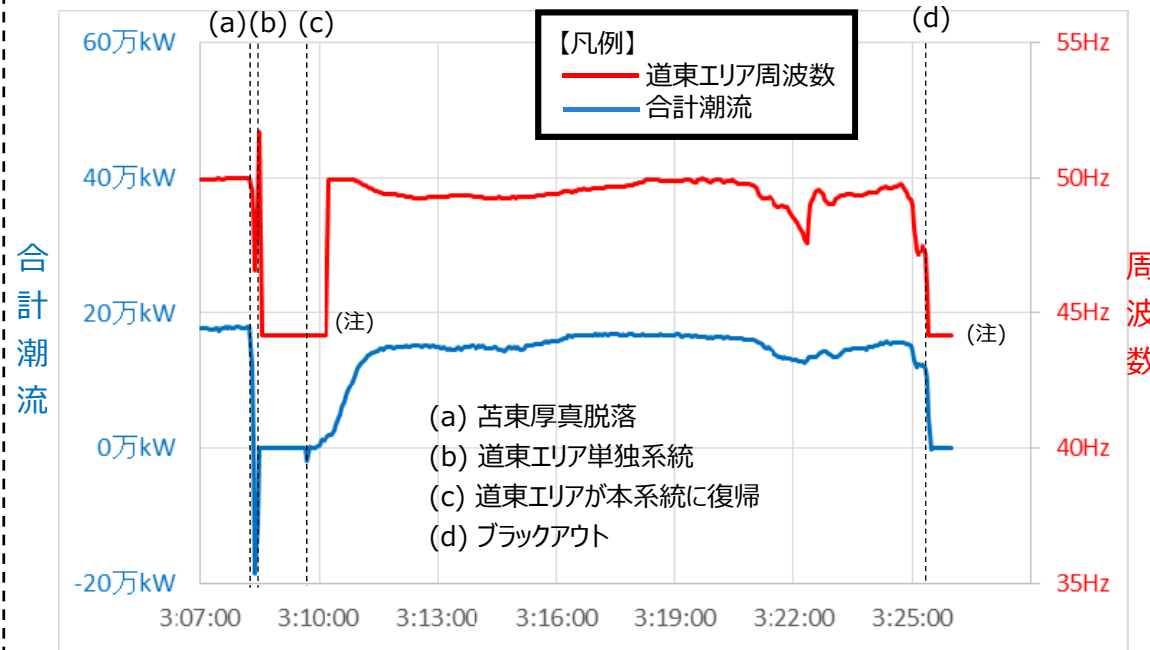
13

■ 苫東厚真脱落～道東エリア単独(3:08～3:09)までの時系列は以下のとおりと推定できる。

- ① 苫東厚真 2、4 号機脱落 → 系統全体の周波数が低下する
- ② UFR動作による負荷遮断 → 道東エリアが発電＞需要となる
- ③ 送電線事故（狩勝幹線、新得追分、日高幹線）により道東エリアが分離され単独系統となる。 → 道東エリアの周波数が上昇する
- ④ 周波数上昇により、道東エリアの水力発電機が停止（OFR※動作）
→ 道東エリアの周波数が低下する → 道東エリアが一旦全停となる

＜苫東脱落～ブラックアウトまでの時系列＞

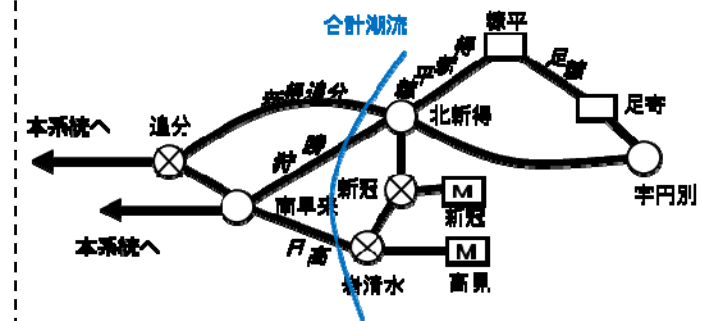
道東エリア周波数：系制（3s）
合計潮流：系制（3s）



＜合計潮流の定義＞

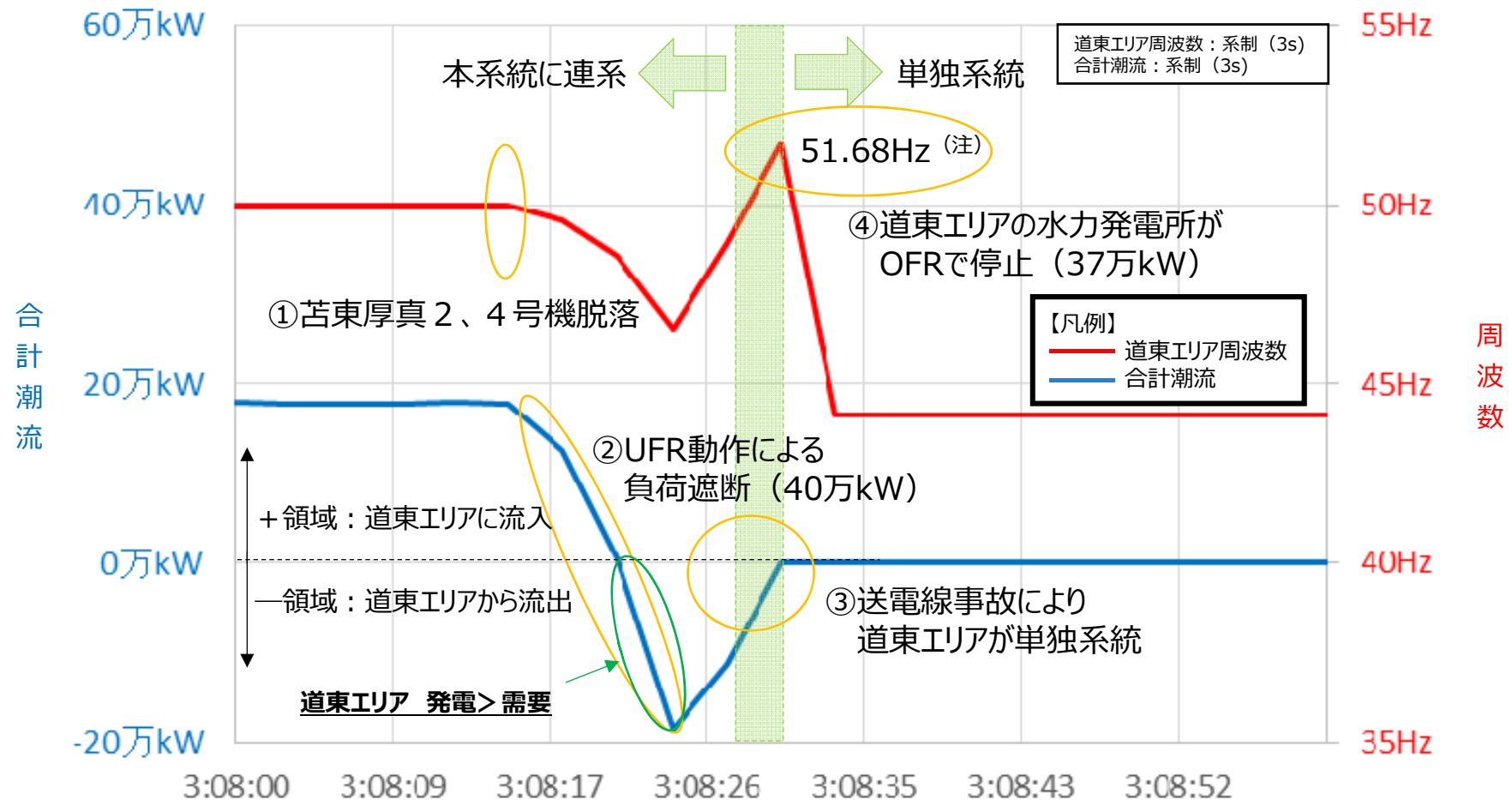
合計潮流：狩勝幹線、新得追分線、日高幹線の合計潮流

+ 値：道東エリアに流入する潮流
- 値：道東エリアから流出する潮流



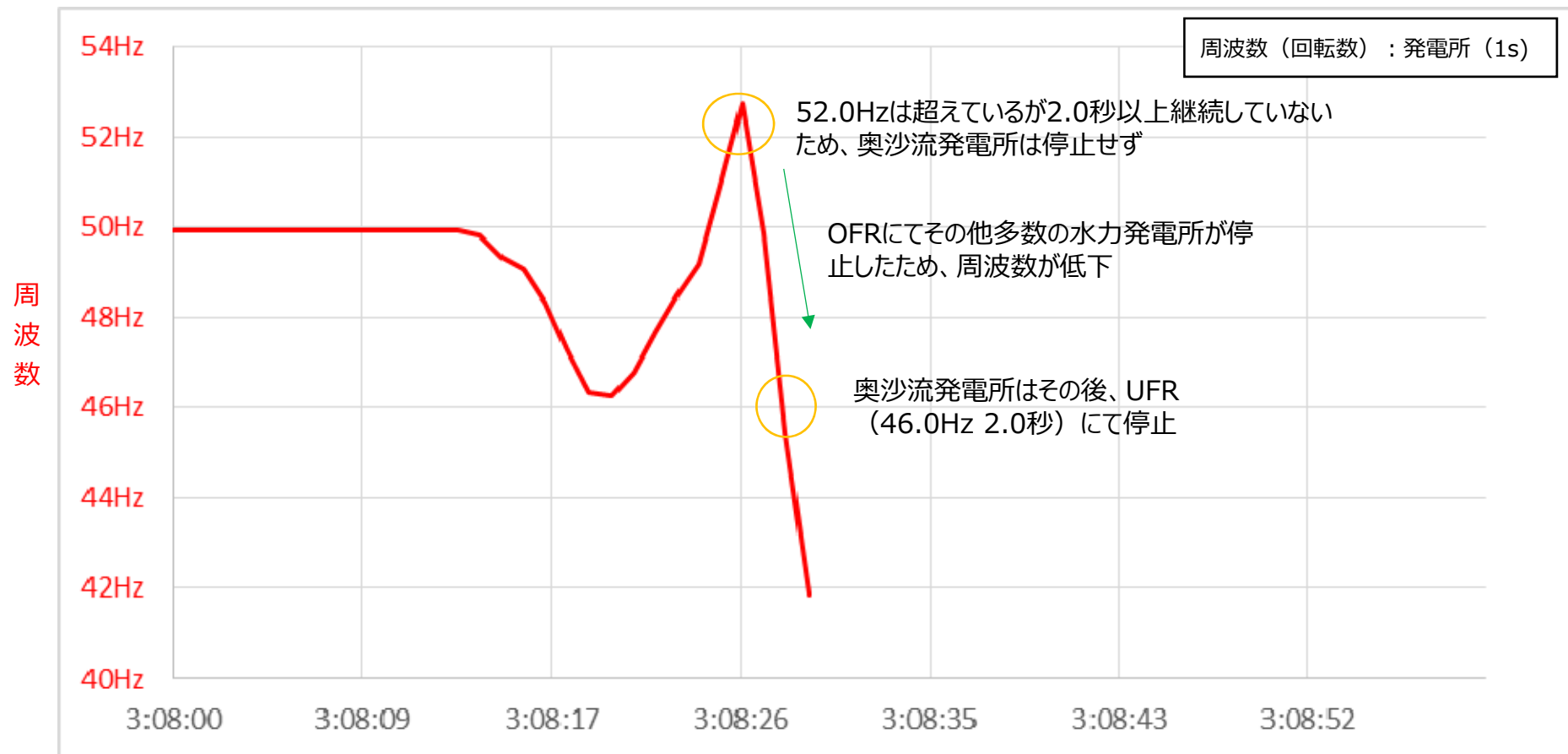
※OFR：Over Frequency Relay(周波数上昇リレー)
供給力が余り、周波数が一定時間、一定値以上となった場合にOFRが動作し、発電機を系統から切り離す。

苫東脱落～道東エリア単独（3:08～3:09）



(注) 測定値は51.68Hzであるが、測定が3秒間隔であること、及び水力発電所のOFR（動作値：52.0Hz 0.5秒）が動作していることから、少なくとも0.5秒以上は52.0Hz以上であったと推定。
ただし、OFRの動作値が52.0Hz 2.0秒の水力発電所は停止していない。
(次シート参照)

OFRが動作していない水力発電所（奥沙流発電所）における周波数（発電機の回転数を周波数換算した値）により、52.0Hzは超えていると推定される。

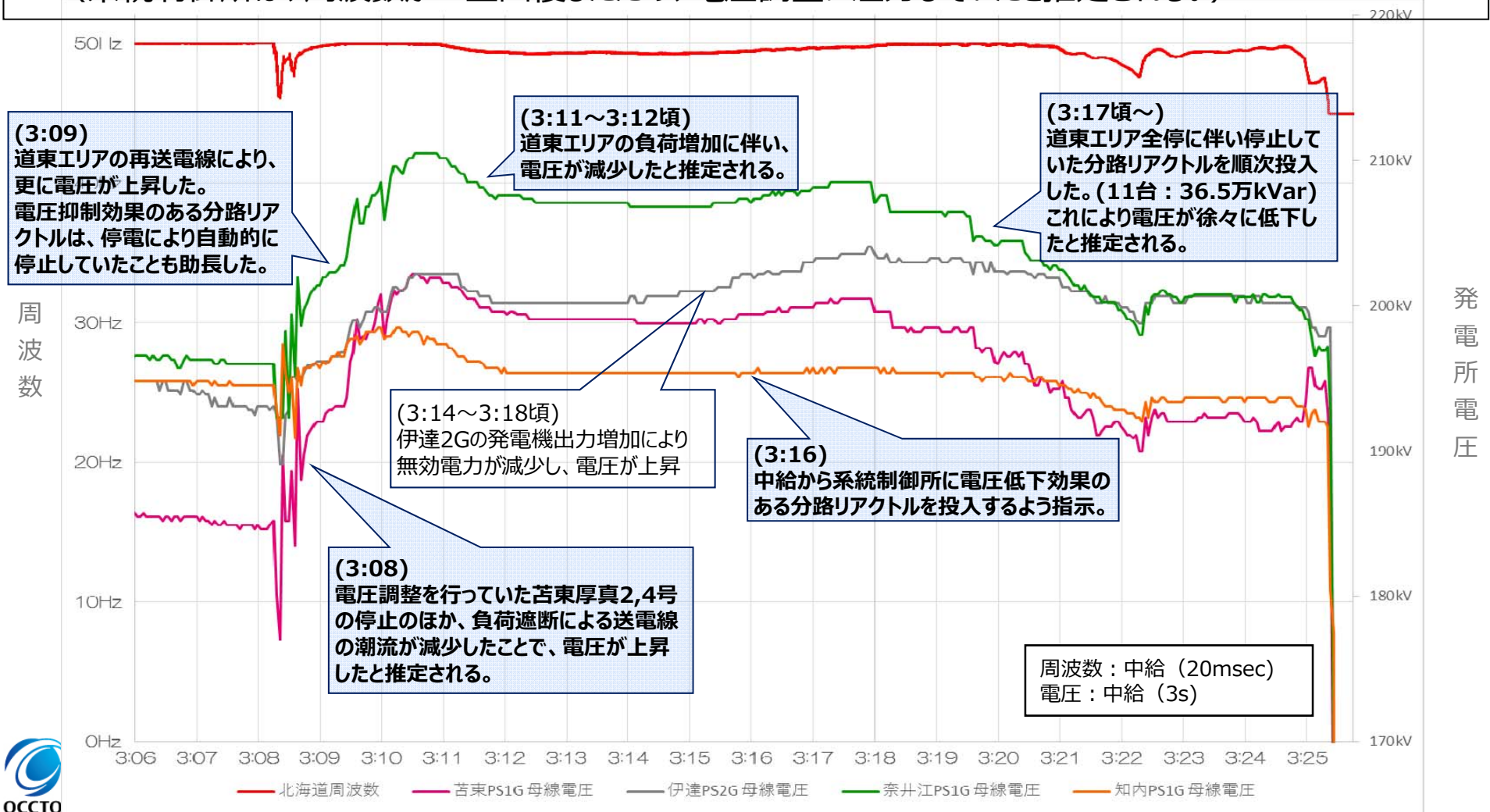


- 第1回検証委員会において、電圧の解析について継続調査となったことから、地震発生以降の電圧および無効電力の推移について調査を行った。
- 結果としては、地震の影響による負荷遮断、送電線事故に伴う負荷の減少および分路リアクトルの解列等により電圧が上昇したことが判明した。また、電圧の上昇を受け、発電機は電圧を低下させる方向の無効電力の供給を行っていたことも判明した。
- 3時18分以降は、分路リアクトルの再並列等により電圧が徐々に低下したことも判明した。
- いずれにおいても、電圧の推移についてはブラックアウトには大きな影響を及ぼしていないと考えられる。

4. 系統電圧の推移について（発電所電圧の状況）

17

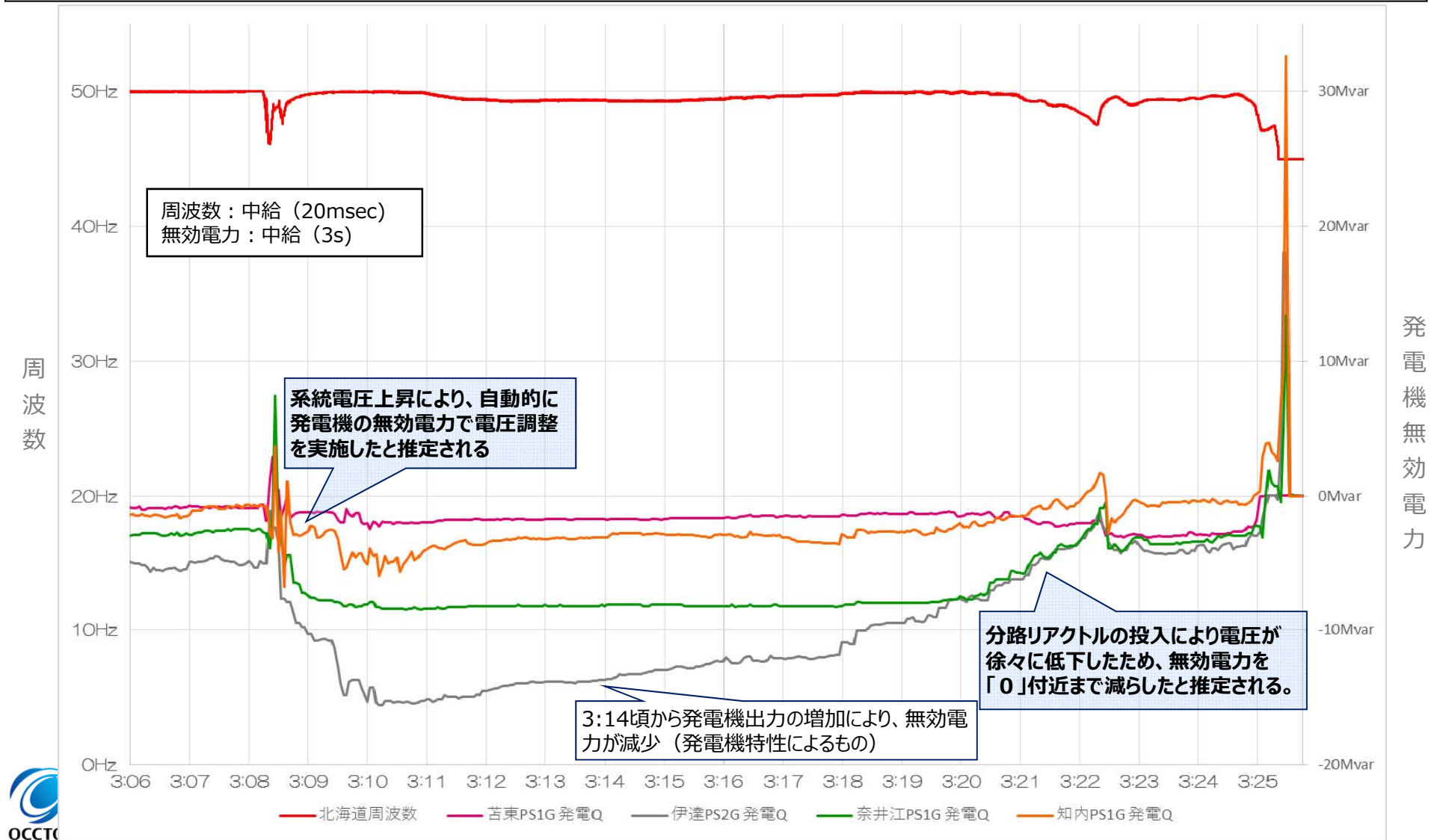
- 地震発生後の各発電所の電圧は以下のとおり。
- 電圧調整を行っていた苫東厚真の発電機の停止のほか、負荷遮断や道東エリアの再送電（道東エリアの停電に伴い電圧抑制効果のある分路リアクトルが自動停止していた）等により電圧が上昇したと推定される。
- 系統制御所からの分路リアクトル再投入などにより、電圧が徐々に低下したと推定される。
（系統制御所は、周波数が一旦回復したため、電圧調整に注力していたと推定される。）



4. 系統電圧の推移について（発電機無効電力の状況）

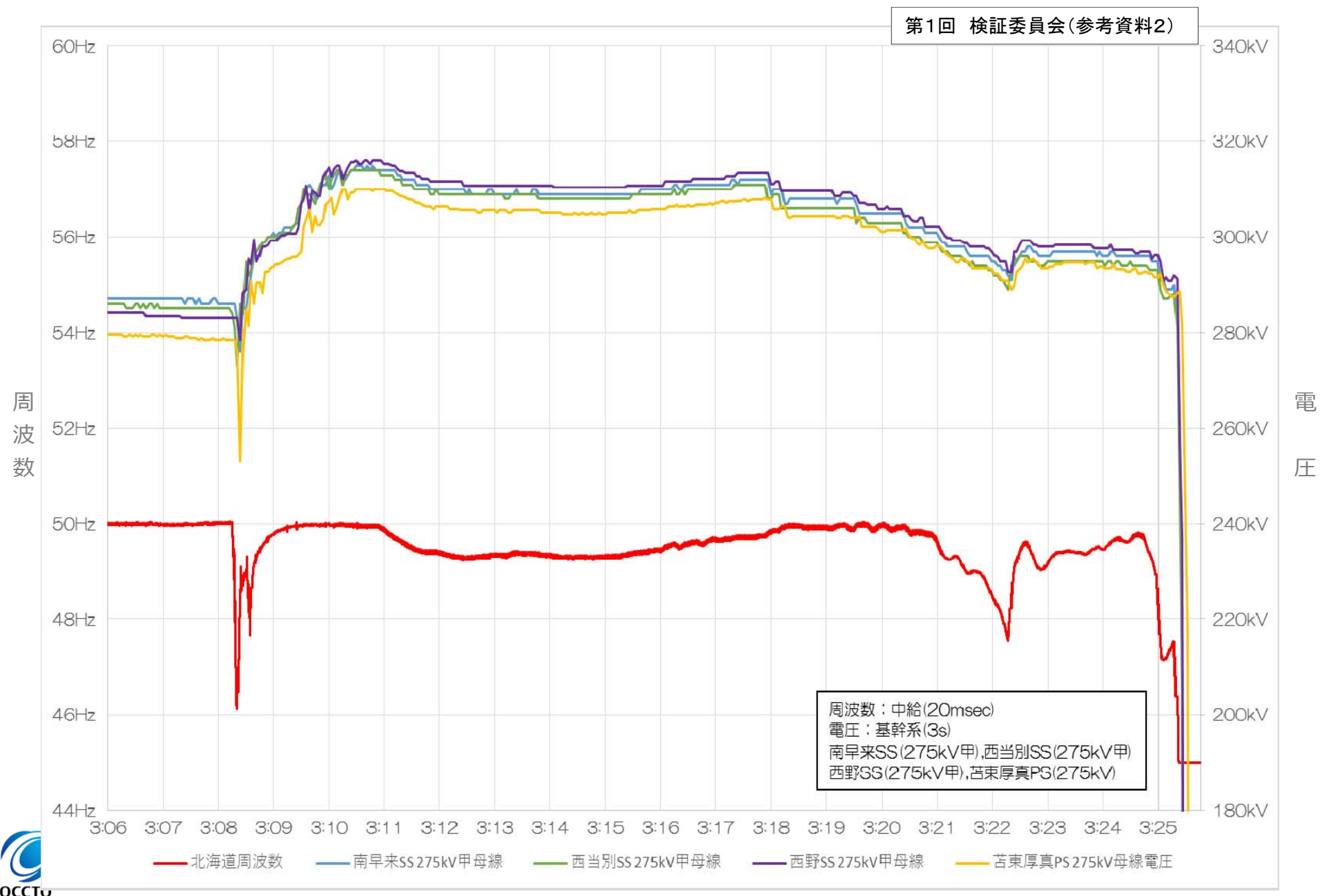
18

- 地震発生後の苫東厚真以外の各発電所の電圧は以下のとおり。
- 地震直後は発電所の母線電圧が上昇したため、下げる方向に無効電力を調整している状況が分かる。
- その後、系統制御所の分路リアクトル再投入により電圧が低下したため、無効電力を減らしたと推定される。



(参考) 275kV母線電圧の状況

19



- 今回の調査で判明したことは以下のとおりである。
 - 地震発生直後に、狩勝幹線、新得追分線、日高幹線で地絡事故が発生し、道東エリアが一時系統分離され、水力（37万kW）が停止した。
 - その結果、道東系水力で確保していたAFC量がゼロとなり、周波数調整能力が著しく低下した。
 - 地震後の電圧挙動についても調査を加えたが、負荷遮断等による電圧上昇に対し、分路リアクトルの投入など適切な電圧制御がされており、ブラックアウト事象との関連は認められなかった。
- 地震発生からブラックアウトに至るまでの事象については、主として、前回委員会で確認された苫東厚真1、2、4号機の停止（N-3）に加え、今回調査で判明した狩勝幹線他2線路の送電線事故（N-4）に伴う水力の停止により周波数制御機能（主にAFC）が喪失したことが**複合要因となり、発生したものと考えられる。**
- 今後詳細についてはシミュレーションによる解析で確認を行うが、現時点では、主要な事象はほぼ解明できたと言えるのではないかと。

地震発生直後① 個別事象の確認 (地震発生～周波数回復)

11

2018/9/6 AM3:08～3:09

個 別 事 象

3.周波数の低下により負荷遮断を行った(需要：▲130万kW)

<確認事項>

需要規模に対して非常に大きな供給力が失われたことにより、稀頻度事故時のみ作動する周波数低下リレー (UFR) が作動している。北海道電力から48.5Hzで0.1秒から21秒、48.0Hzで0.1秒から6秒の時限で周波数低下リレー整定値が設定されていることを確認。UFRの負荷遮断量は変電所の負荷量にて確認。なお一部負荷 (6万kW) は誤って再度送電 (自動) されたこと、ヒアリングにて設定のミスがあったことを確認。

<事実認定>

周波数の低下に伴い、北本AFC動作後にUFRの時限がスタートし、時限で順次負荷遮断動作しており、計130万kWの負荷遮断が行われていることはほぼ間違いのない事実と認められるのではないかと。

4.狩勝幹線、新得追分線、日高幹線の送電線故障により、道東エリア及び北見エリアが停電(需要：▲約13万kW)、水力が停止した(発電：水力▲43万kW)

<確認事項>

送電線事故は狩勝幹線、新得追分線、日高幹線の送電線事故による停止を確認。地震動による揺れで地絡が生じた可能性があるが事故箇所は確認できていない。送電線の事故により道東エリア及び北見エリアは周波数が上昇。これに伴い発電機、負荷ともに停止。UFR動作後に残っていた13万kW (送電線潮流からの推定値) の需要が停電したことについてテレメータ (遠隔測定) で確認。加えて水力43万kWが停止していることをテレメータで確認。

<事実認定>

地絡事故の有無については、リレーの誤動作の可能性も含め現時点で明らかではない。ただし送電線が停止し、停電に至ったことは、記録から明らかである。発電機停止の状況が全ては確認できないが送電線事故が起因していることは可能性の高い事実として認められるのではないかと。

5.周波数の低下により風力が停止した(発電：風力▲17万kW)

<確認事項>

風力の停止についてはテレメータ (遠隔測定) の記録から確認。ただし、風力▲17万kWの確認できた北海道から受領した特高連系のみの積み上げ。高圧以下は確認できない。

<事実認定>

記録から地震直前に17万kWの出力で発電していた風力が停止したことについてはほぼ間違いのない事実として認められるのではないかと。

3.周波数の低下により負荷遮断を行った(需要 : ▲130万kW)**<確認事項>**

需要規模に対して非常に大きな供給力が失われたことにより、稀頻度事故時のみ作動する周波数低下リレー (UFR) が作動している。北海道電力から48.5Hzで0.1秒から21秒、48.0Hzで0.1秒から6秒の時限で周波数低下リレー整定値が設定されていることを確認。UFRの負荷遮断量は変電所の負荷量にて確認。なお一部負荷 (6万kW) は誤って再度送電 (自動) されたこと、ヒアリングにて設定のミスがあったことを確認。

<事実認定>

周波数の低下に伴い、北本AFC動作後にUFRの時限がスタートし、時限で順次負荷遮断動作しており、計130万kWの負荷遮断が行われていることはほぼ間違いない事実と認められるのではないかと。

4.周波数の低下により風力が停止した(発電 : 風力▲17万kW)**<確認事項>**

風力の停止についてはテレメータ (遠隔測定) の記録から確認。ただし、風力▲17万kWの確認できた北海道から受領した特高連系のみの積み上げ。高圧以下は確認できない。

<事実認定>

記録から地震直前に17万kWの出力で発電していた風力が停止したことについてはほぼ間違いない事実として認められるのではないかと。

5.狩勝幹線、新得追分線、日高幹線の送電線事故により、道東エリア及び北見エリアが停電(需要 : ▲約13万kW)、水力が停止した(発電 : 水力▲37万kW(その他送電線事故等を含め北海道全体で43万kW))**<確認事項>**

送電線事故は狩勝幹線、新得追分線、日高幹線の送電線事故による停止を確認。巡視の結果、停止した全ての回線において同様なアーク痕が確認されており、その原因はジャンパー線と架線金物の接近による地絡事故と考えられる。送電線の事故により道東エリア及び北見エリアは周波数が上昇。これに伴い発電機が停止し道東エリア及び北見エリアが停電した。UFR動作後に残っていた13万kW (送電線潮流からの推定値) の需要が停電したことについてテレメータ (遠隔測定) で確認。加えて北海道全体で水力43万kWが停止していることをテレメータで確認。

<事実認定>

中給やオシログラフの記録、アーク痕などから各送電線で地絡事故があったことはほぼ間違いない事実として認められるのではないかと。また、送電線事故により道東エリア等が単独系統となり、周波数上昇により水力が停止したことはほぼ間違いない事実として認められるのではないかと。

地震発生直後① 個別事象の確認 (地震発生～周波数回復)

12

2018/9/6 AM3:08～3:09

個 別 事 象

6. 周波数の低下が46.13Hzで止まり、回復方向に切り替わった

<確認事項>

水力発電所の多くは46.0Hzでリレーが動作することを確認しており、周波数がいくつまで下がったかを正確に確認する必要がある。このため、20ミリ秒(0.02秒)単位で記録した中給データにより確認を行い、46.13Hzが下限であることを確認。

<事実認定>

周波数が46.13Hzが下限であったことは、記録からほぼ間違いない事実として認められるのではないかな。

7. 中央給電指令所よりバランス停止中の水力・火力発電機に起動指令を行った

<確認事項>

5時半並列の予定であった奈井江2号機の起動を早めること、停止中の水力発電機、伊達1号機、砂川3、4号機についても中給から起動の指令が出ていることが中給指令の記録で確認した。なお、限られた時間の中で立ち上げを試みたが一部を除き立ち上がる前にブラックアウトになっている。

<事実認定>

記録から中給からの指令により、バランス停止の水力・火力について起動指令を出されていることは、ほぼ間違いない事実と認められるのではないかな。なお、水力の出力が増加しなかったことについては次回検証が必要ではないかな。

8. 北本連系設備や水力のAFC機能により周波数が一時的に50Hzでバランスした

<確認事項>

北本連系設備からの受電量は道内の系統が不安定であったため、直流から交流への変換(転流)が数秒間できなかったが、すぐに正常動作に戻り、需要規模を支えるためには十分であったため7万kWから道内受電量最大の57万kW(+約50万kW)まで徐々に増加している。北本連系線の受電電力の頭打ちと周波数安定の時間の相関が確認できる。

<事実認定>

少なくとも北本連系設備が需給をバランスさせた状態であったことは、ほぼ間違いない事実と認められるのではないかな。

個 別 事 象

6.周波数の低下が46.13Hzで止まり、回復方向に切り替わった**<確認事項>**

水力発電所の多くは46.0Hzでリレーが動作することを確認しており、周波数がいくつまで下がったかを正確に確認する必要がある。このため、20ミリ秒（0.02秒）単位で記録した中給データにより確認を行い、46.13Hzが下限であることを確認。

<事実認定>

周波数が46.13Hzが下限であったことは、記録からほぼ間違いない事実として認められるのではないかな。

7.中央給電指令所よりバランス停止中の水力・火力発電機に起動指令を行った**<確認事項>**

5時半並列の予定であった奈井江2号機の起動を早めること、停止中の水力発電機、伊達1号機、砂川3、4号機についても中給から起動の指令が出ていることが中給指令の記録で確認した。なお、限られた時間の中で立ち上げを試みたが一部を除き立ち上がる前にブラックアウトになっている。なお、バランス停止中の水力は起動指令が出ていたが、一時的に周波数が回復したことから、自動的に起動指令が解除された。

<事実認定>

記録から中給からの指令により、バランス停止の水力・火力について起動指令を出されていることは、ほぼ間違いない事実と認められるのではないかな。~~なお、水力の出力が増加しなかったことについては次回検証が必要ではないかな。~~

8.北本連系設備や水力のAFC機能により周波数が一時的に50Hzでバランスした**<確認事項>**

北本連系設備からの受電量は道内の系統が不安定であったため、直流から交流への変換（転流）が数秒間できなかったが、すぐに正常動作に戻り、需要規模を支えるためには十分であったため7万kWから道内受電量最大の57万kW（+約50万kW）まで徐々に増加している。北本連系線の受電電力の頭打ちと周波数安定の時間の相関が確認できる。

<事実認定>

少なくとも北本連系設備が需給をバランスさせた状態であったことは、ほぼ間違いない事実と認められるのではないかな。