



イベリア半島における大規模停電

ー判明していること・解明が期待されることー

電力中央研究所 研究参事
グリッドイノベーション研究本部
ネットワーク技術研究部門長

永田 真幸

2025年6月3日

 電力中央研究所

停電の概要

- 発生日時：
2025年4月28日（月）
12:33（中央ヨーロッパ時間）
- 停電の規模：
スペインおよびポルトガルの全停
（停電前の需要は31GW程度）
フランス一部地域の短時間の停電
- 復旧：
スペインでは29日朝の時点でほぼ復旧
ポルトガルでは28日深夜までに
全変電所が復旧



停電直後の報道等での情報の例

■ 断片的な情報が多く流れた

- スペインでの5秒で15GWの供給力喪失
- スペインでの電源停止と1.5秒後の電源停止
- フランスでの電源停止
- フランス・スペイン間での系統分離
- . . .

■ 以下は否定, ないし, 継続調査とされた

- サイバー攻撃による影響
- 異常な気象現象による影響

着目した情報と以降の紹介内容

■ 5月に入って時系列の情報が出てきた

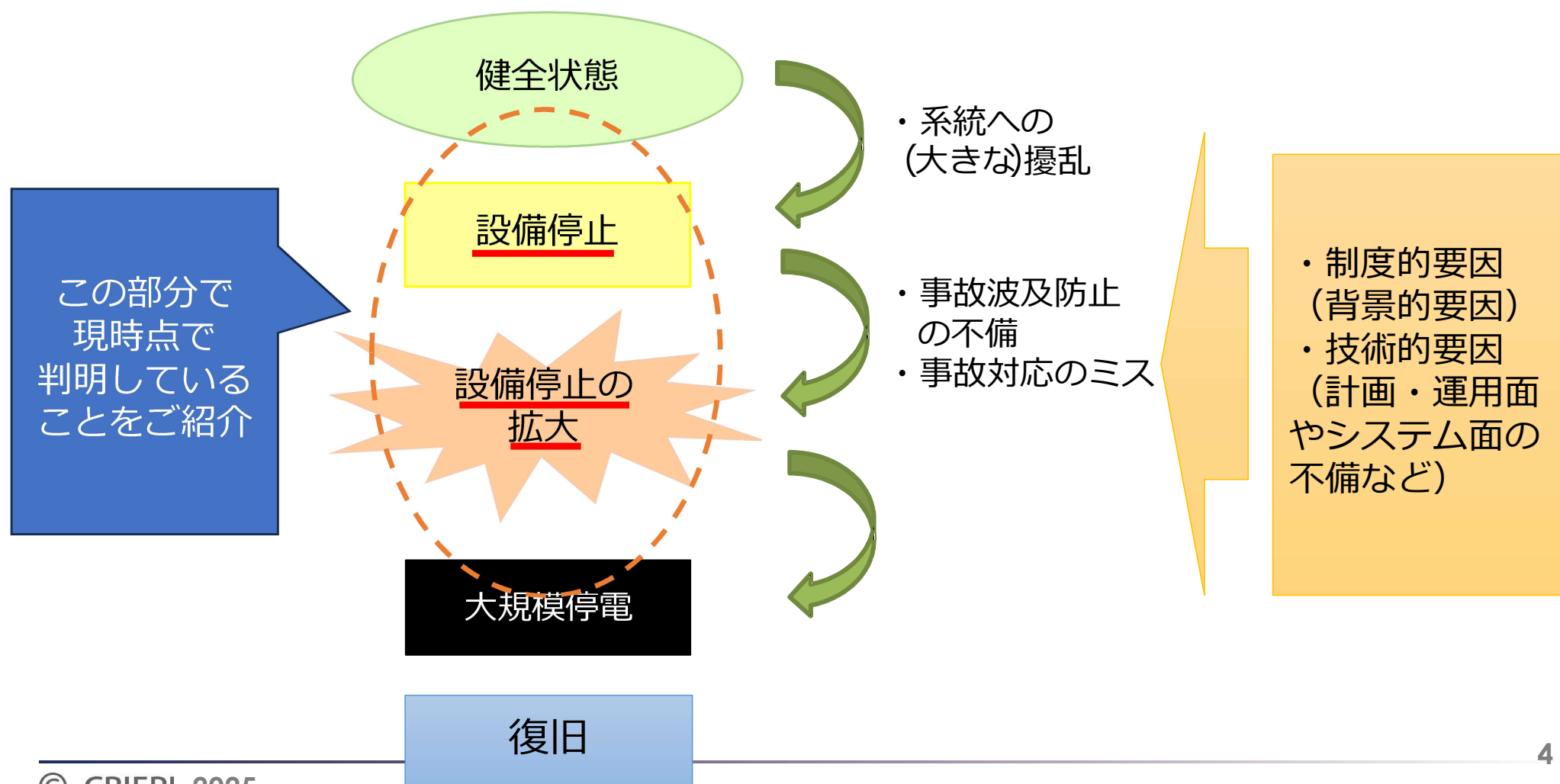
- 5/9にENTSO-Eから停電に至る時系列のごく簡単な概略が示された¹⁾
 - ✓ 5/1に専門家パネルを立ち上げ、調査を開始することが発表されていた
- 研究機関等から、停電発生時を含む周波数の推移が計測結果を基に公表された
- 5/14の報道 スペイン環境移行大臣「停電に至る初期段階で、グラナダ、続いてバダホス、セビリアで発電の喪失が生じた」²⁾



■ これらの情報の整理を基に、**停電発生時に「何が起こったか」**について、明らかにになっている点を紹介

大停電に至るメカニズム

- 過去の多くの大停電の事例では「大停電の発端となる故障(事象)」と「事故(影響)が波及する段階」がある



停電前のスペインの需給状況

- REE（スペインのTSO）から公表されている12:30時点の5分値
 - 需要：約25GW（他に揚水動力 3GW, 輸出 約4GW)
 - 供給力（概略値）
 - 再エネ比率は80%強,
太陽光, 風力で66%
 - ✓ 再エネ：太陽光(17.7GW), 風力(3.5GW), 水力(3.2GW), 太陽熱(1.5GW) など
 - ✓ 非再エネ：原子力(3.4GW), コンバインド(1.0GW), コジェネおよび廃棄物発電 (1.4GW) など
 - 連系線
 - フランス側へ輸出, 量は多くはない
 - ✓ スペイン-モロッコ：780MW程度（輸出方向）
 - ✓ スペイン-フランス：870MW程度（輸出方向）
 - ✓ スペイン-ポルトガル：2,650MW（輸出方向）

フランス・
スペイン間の
連系容量は
2,800MW

参考：スペインでの自家消費の太陽光発電

- スペインは、国家統合エネルギー・気候計画の中で、自家消費の太陽光発電について「2030年までに19GW」の目標を掲げている
- スペインの年間の最大電力需要は、2007年の約45GWをピークに低下傾向にあり、至近3年間（2022-2024）は38GW程度である。低下の原因の一つが自家消費の太陽光発電等の導入進展と思われる
- 2024年末での自家消費の太陽光発電の容量は8.5GWとされている¹⁾
- このようにBehind the meterにも太陽光発電等がある点には留意する必要があると思われる

停電に至る概略の時系列

■ ENTSO-Eから5月9日付で公表された情報

<事象前>

- 2度の広域での電力と周波数の動揺現象（12:03-12:09, 12:19-12:21）

<事象の概略の時系列>

①

- 12:32:57から20秒間 スペイン系統の南部での一連の発電機停止が発生、周波数が低下、電圧が上昇
✓ 脱落量は合計で2200MWと推定
- 12:33:18-12:33:21 この間イベリア半島の系統での周波数低下が継続し、48.0Hzに至り**負荷遮断**

②

- 12:33:21 系統間脱調により、スペイン・フランス間の**交流連系線が停止**

③

- 12:33:24 イベリア半島の**系統が完全に崩壊**、スペイン・フランス間の**直流連系設備が停止**

停電発生時を含む周波数の推移

- 研究機関等から周波数の計測結果が公表されている
 - 独フラウンホーファー研究機構^{注1)}の太陽エネルギー研究所公表のもの¹⁾ (以下, フラウンホーファーISE)
 - ✓ マラガ (スペイン), ポルト (ポルトガル) フライブルグ (ドイツ) での計測結果
 - ✓ マラガとポルトの計測データは Gridraderによるもの
 - 米EPRI公表のもの²⁾ (以下, EPRI)
 - ✓ スペインを含む5か国での計測結果, 地点の詳細は不明
 - ✓ 米大学のFNT/GridEyeプロジェクトでの計測結果 (欧州大陸部で16の計測)



注1: ドイツ各地に75の研究所を構える欧州最大の科学技術分野における応用研究機関

注2: 図はENTSO-E, [ENTSO-E expert panel initiates the investigation into the causes of Iberian blackout](#) を基に作成

①スペインでの電源停止による周波数低下

①－1 ➤ 12:32:57から20秒間

スペイン系統の南部での一連の発電機停止が発生，
周波数が低下，電圧が上昇

✓脱落量は合計で2200MWと推定

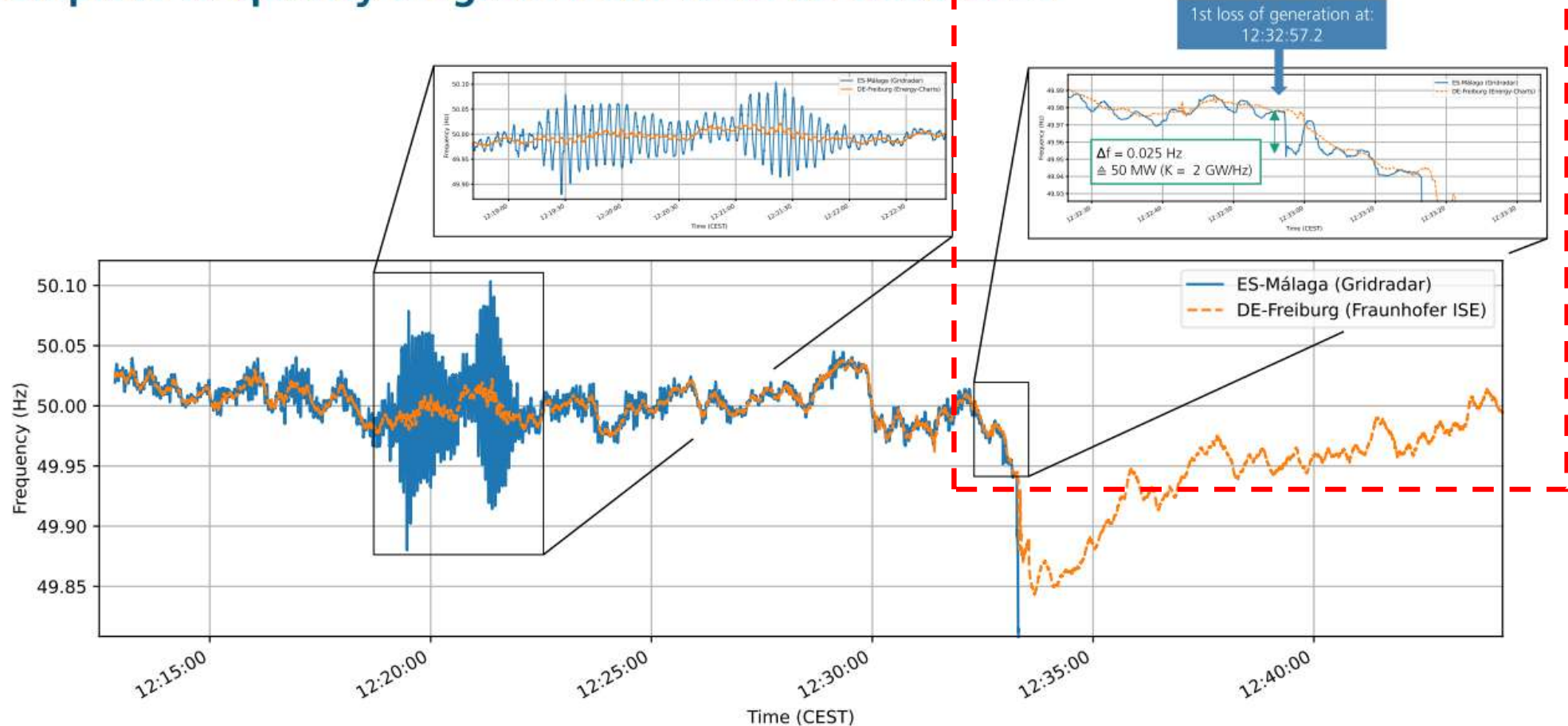
①－2 ➤ 12:33:18-12:33:21（3秒間）

イベリア半島の系統での周波数低下が継続し，
48.0Hzに至り負荷遮断

①－1：最初の電源停止（ブラウンホーファーISE）

- ・ 12:32:57の電源停止（最初の事象）
- ・ 規模は50MW程度と推測されている

Complete frequency diagram from 12:13 to 12:50 CEST



■ : 他機関の情報と整合していると思われる ■ : 他機関の情報との整合が不明

①－１：最初の電源停止（EPRI）

I-411

T-19s

First incident

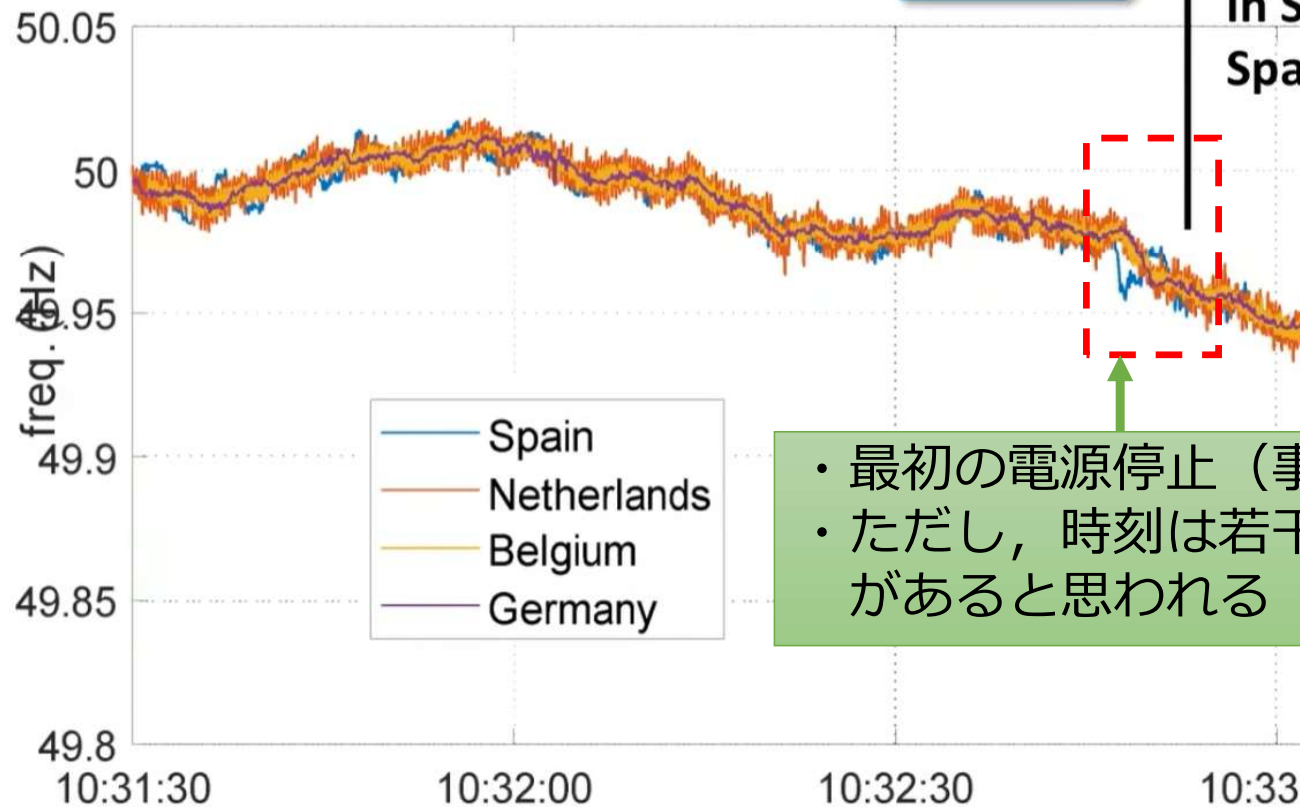
EPRI

+930

Sean McGuinness

T-19s

Precursor trip of generator
in Southern Spain, per
Spanish Gov, May 5th



- ・最初の電源停止（事象）
- ・ただし、時刻は若干のずれがあると思われる

Source: **UTK FNET/**
GridEye

時刻は中央
ヨーロッパ時間と
2時間ずれ

EPRI, [Webcast of Initial Findings from April 28, 2025 Iberia Blackout](#) を基に作成

電源脱落について

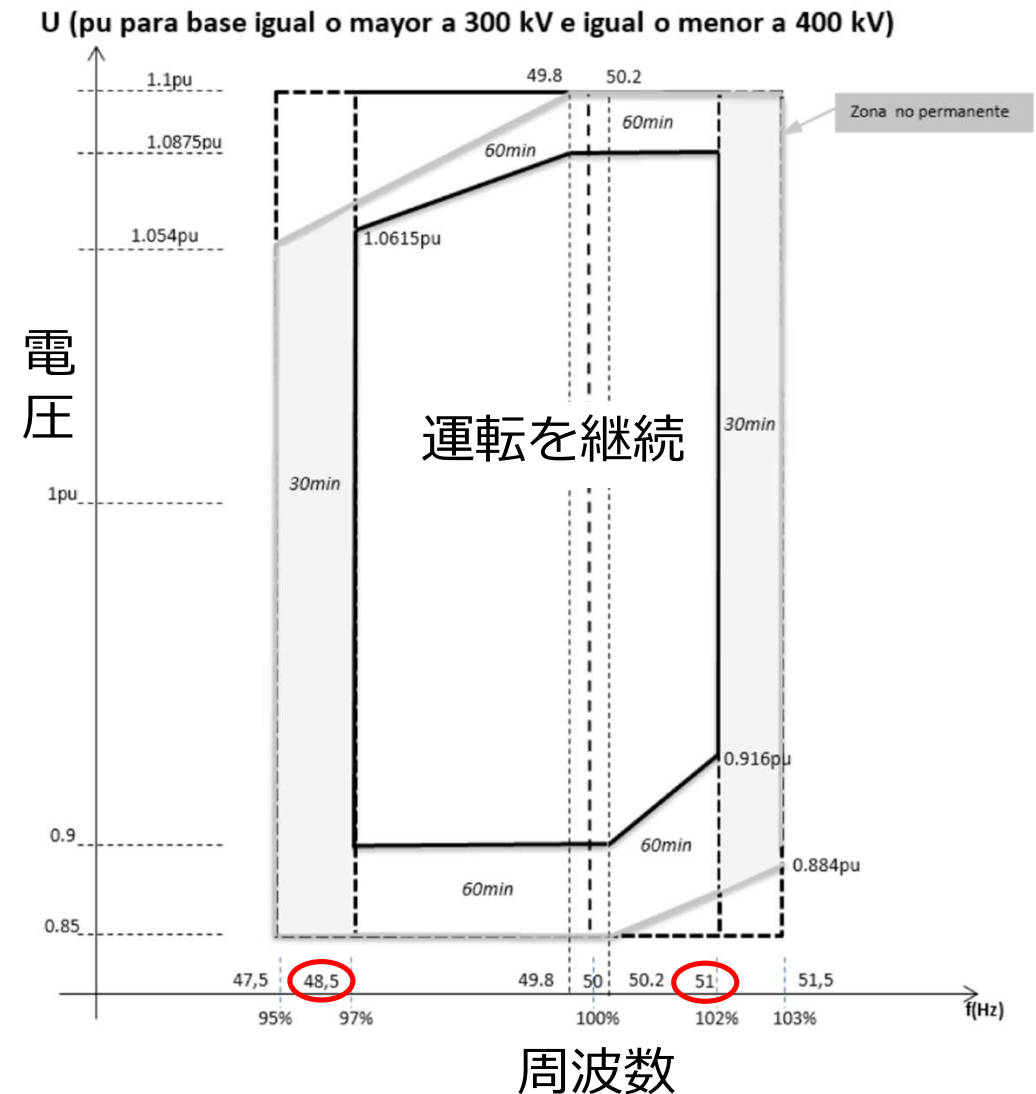
- 稼働中の電源が予定外に停止する原因は幾つか考えられる
 - 電源側の故障（電源設備，連系設備など）
 - 短時間に連続して生じることが考えにくい
 - 系統側での設備停止（電源線の停止など）
 - 系統側での異常な周波数・電圧
 - ✓ 連系要件で，運転継続が求められる範囲が規定されている
 - 脱調（同期発電機の場合）
 - 後述

スペインの連系要件（周波数面の例）

■ 周波数・電圧範囲（V/f）

右図は300kV～400kVに連系する場合

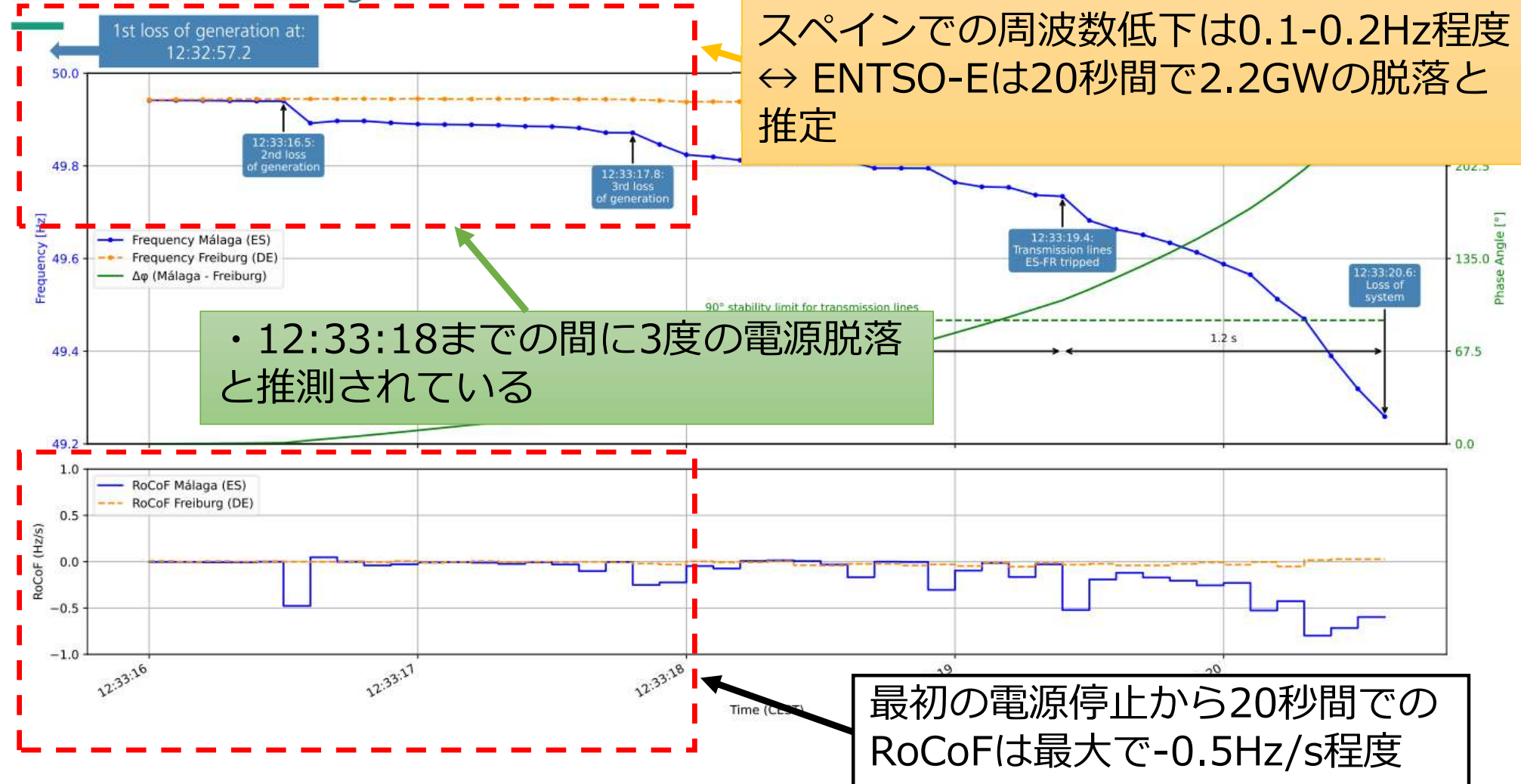
- **RoCoF** (Rate of Change of Frequency: 周波数変化率)
500m秒の移動時間窓で最大 2 Hz/秒の周波数変動での運転継続が求められている



①－１：周波数低下（フラウンホーファーISE）

Timeline of system break starting at 12:33:16.5 CEST

Max. RoCoF for Málaga: -0.8 Hz/s

Fraunhofer ISE, [Frequency analysis - Spanish Black Out on April 28th, 2025](#) を基に作成

①－1：周波数低下（EPRI）

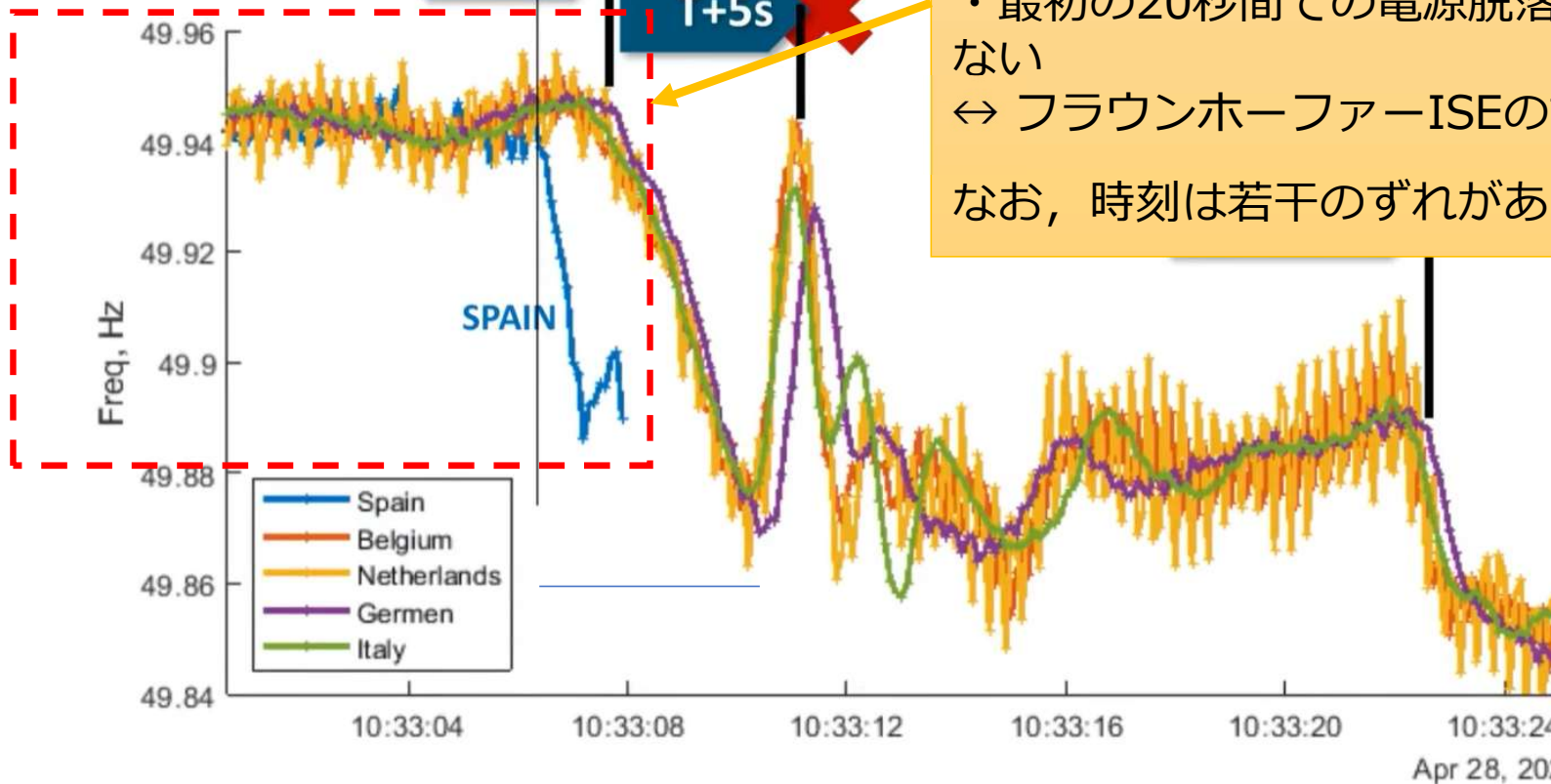
Cascade

Multiple incidents

最初の電源停止
から約20秒

T+1.5s

T+5s



- ・周波数の低下は、推移が示されている範囲では0.1Hz程度
⇔ フラウンホーファーISEの計測では0.1-0.2Hz程度低下
 - ・最初の20秒間での電源脱落の回数は判然としない
⇔ フラウンホーファーISEの計測では3度
- なお、時刻は若干のずれがあると思われる

時刻は中央
ヨーロッパ時間と
2時間ずれ

①－1：スペインでの電源停止・周波数低下

＜判明していること＞

- 12:32:57の電源停止が最初の事象
- 以降の20秒間で、**計3度の電源停止**が発生
(ただし停止の原因等の詳細は明らかになっていない)
- スペイン・ポルトガルで電圧が上昇したとされる
(ただし詳細は明らかになっていない)
- 周波数の大きな低下、大きなRoCoFの発生を示す計測結果等
等は出てきていない
(地域・地点により状況が異なっていた可能性がある)

①－1：スペインでの電源停止・周波数低下

＜解明が期待されること＞

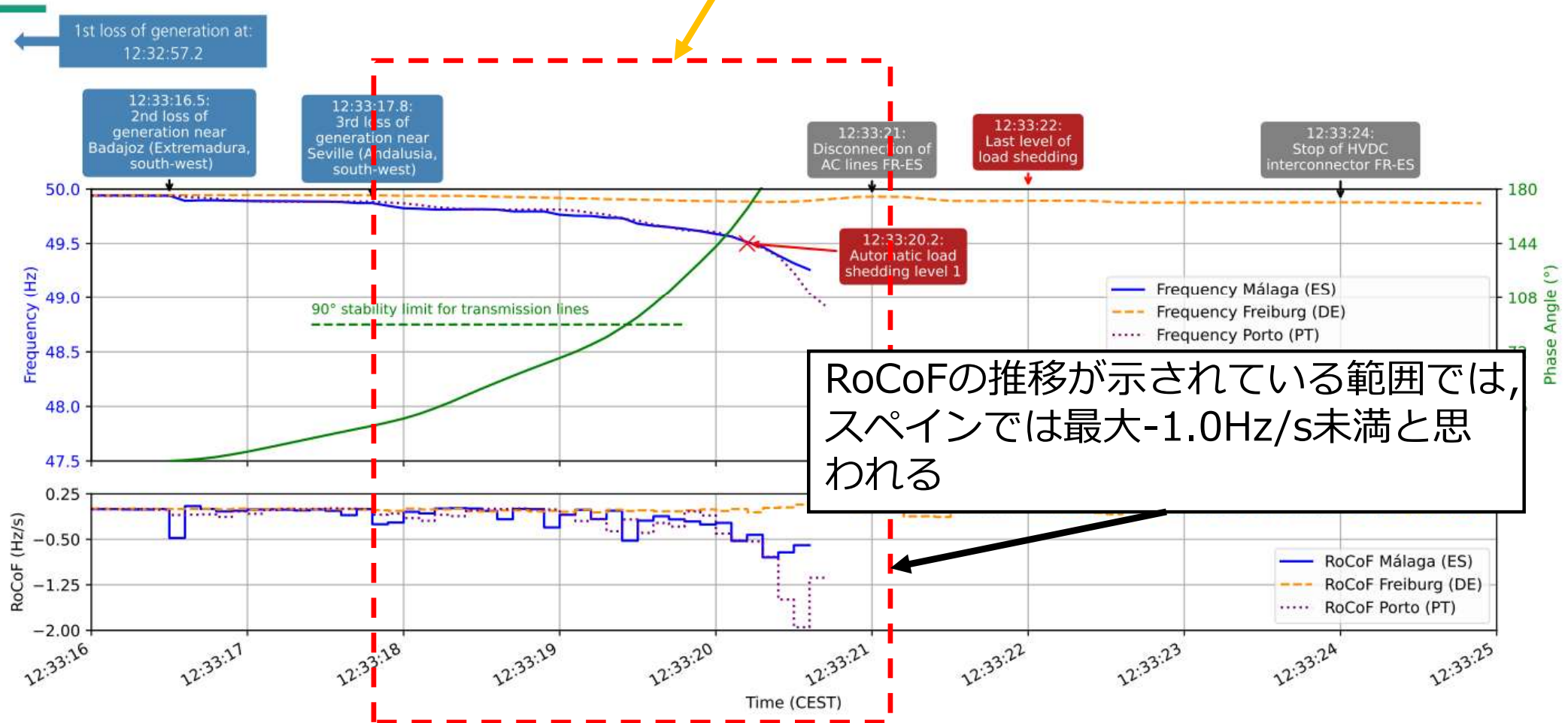
- 詳細が不明なことが多く、例えば以下の点が考えられる
 - 電源停止の原因は何か（何が影響したのか）
 - ネットワークではどんな事象が発生したのか
 - イベリア半島の系統の各部での状況がどう変化したのか

①－2：周波数低下の継続，負荷遮断 (ブラウンホーフアーISE)

Timeline of system break

12:33:16.5 to 12:33:24 CEST

周波数の推移が示されている範囲では
48.0Hzまでの低下は見られない



Fraunhofer ISE, [Frequency analysis - Spanish Black Out on April 28th, 2025](#) を基に作成

①－2：周波数低下の継続，負荷遮断 (EPRI)

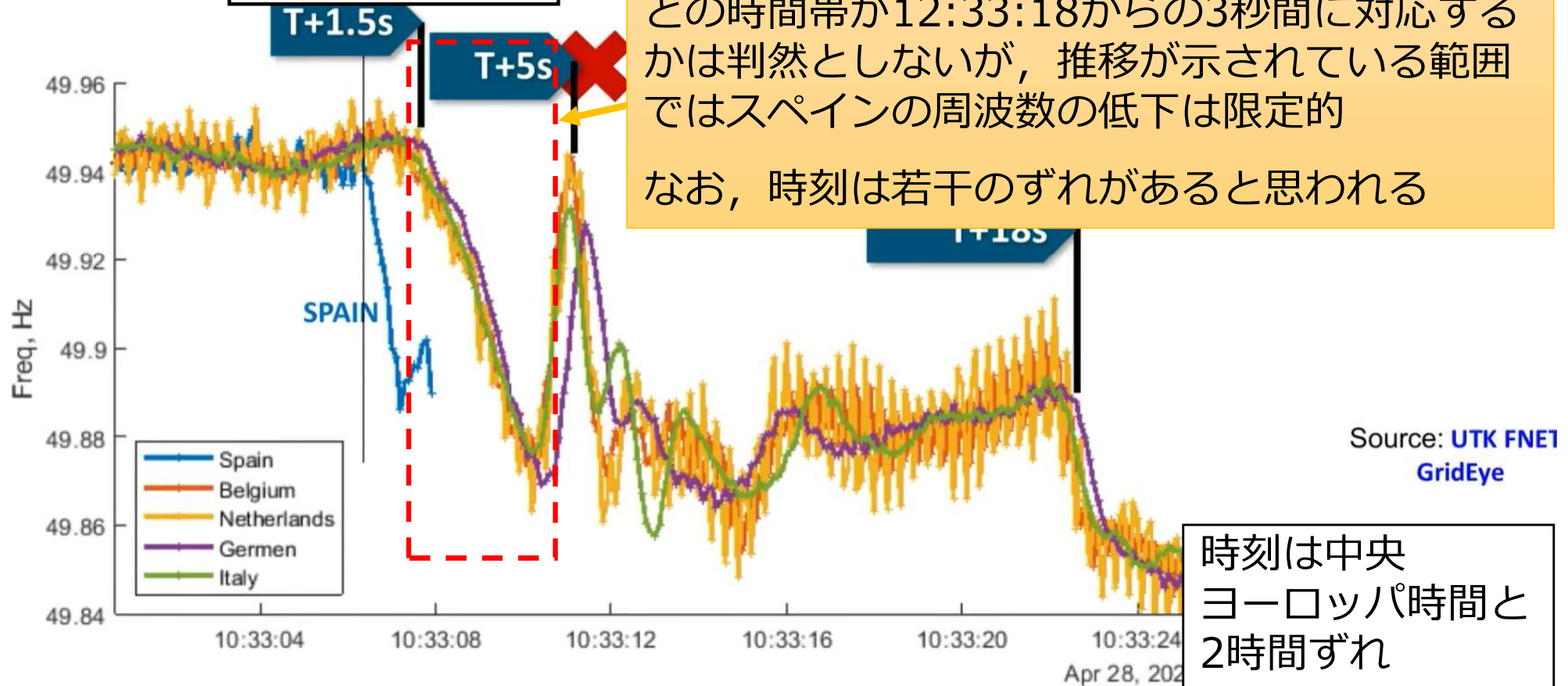
Cascade

Multiple incidents

最初の電源停止
から約20秒

Second generation loss in se

Simultaneous RES Trip - Spai



EPRI, [Webcast of Initial Findings from April 28, 2025 Iberia Blackout](#) を基に作成

①－2：周波数低下の継続，負荷遮断

＜判明していること＞

- 12:33:18からの3秒間についての情報が乏しいが，スペインでの周波数は，推移が示されている範囲では，49Hzに至らず，RoCoFも1Hz/秒未満
- 周波数低下が継続し，48.0Hzに至ったとされていることから，電源の脱落が引き続き生じた可能性が高い

①－２：周波数低下の継続，負荷遮断

＜説明が期待されること＞

- 電源の脱落以外の点も含め，例えば以下の詳細の説明が期待される
 - 電源の脱落やネットワークで発生した事象とその時系列，原因
 - 揚水遮断，負荷遮断(Automatic load shedding)はどのように動作したのか
 - イベリア半島の系統の各部での状況がどう推移したのか

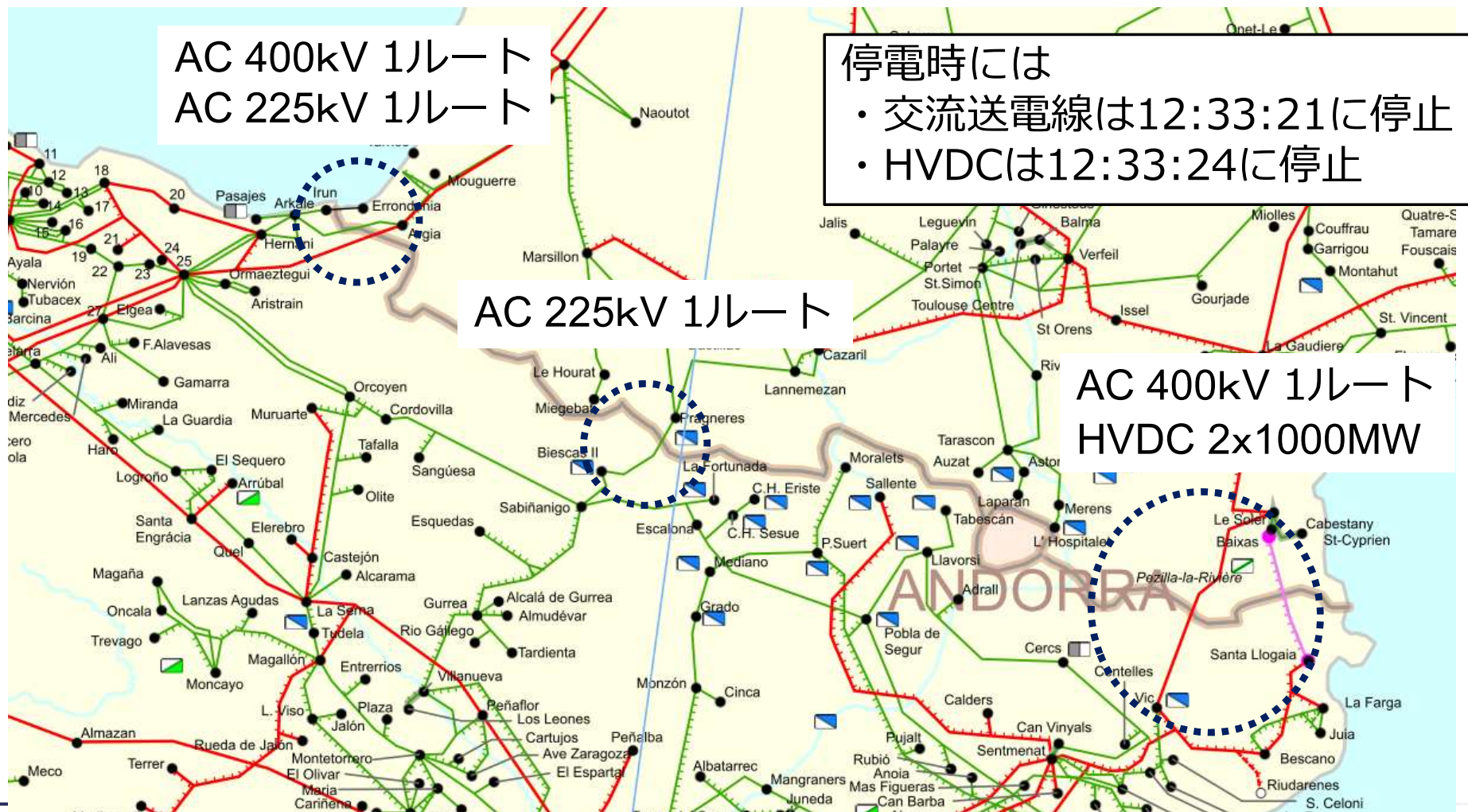
②系統間脱調によるスペイン・フランス間の交流連系喪失

➤ **12:33:21**

系統間脱調により、スペイン・フランス間の交流連系線が停止

スペイン・フランス間の連系設備

- 交流送電線（400kVおよび225kV）4ルートと, HVDC
- 総連系容量は2,800MWとされている



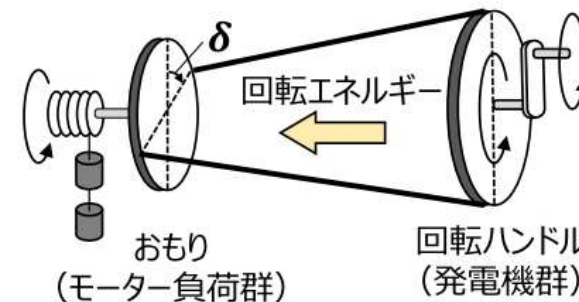
同期安定性と脱調

- 系統内の全ての同期発電機が同じ速度で回転し続けられるか否かが「**同期安定性**」
- 回転し続けられない状態を「**脱調**」という
 - 発電機が脱調した場合は、系統から解列する必要がある

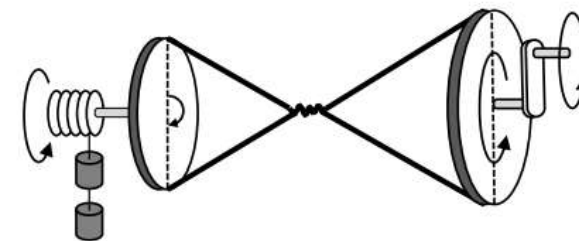


(G) : 発電機 (群)
(M) : モーター負荷 (群)

(モデル系統)



(同期運転状態)

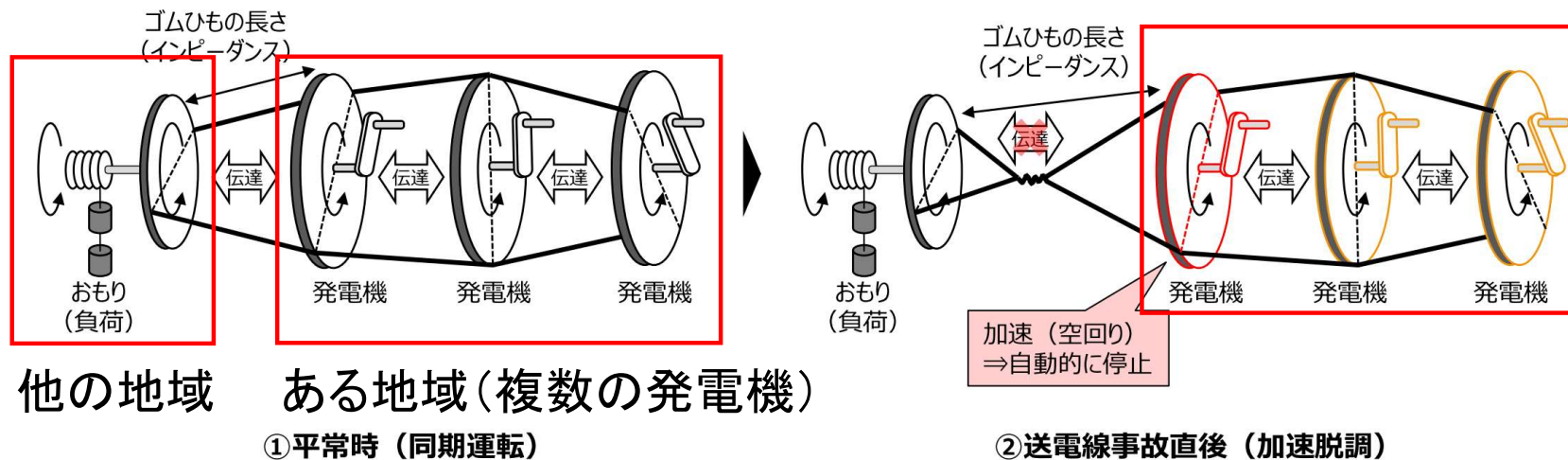


(脱調 (同期はずれ) 状態)

左図のⒺを切り離す必要がある

系統間脱調

- 脱調はある地域の複数の発電機と他の地域の複数の発電機の間でも生じることがある。この場合を「**系統間脱調**」という。系統間脱調の場合、**地域間で系統を切り離す**必要がある
- 系統間脱調には、複数の地域をまたぐ広域的な動揺が関係



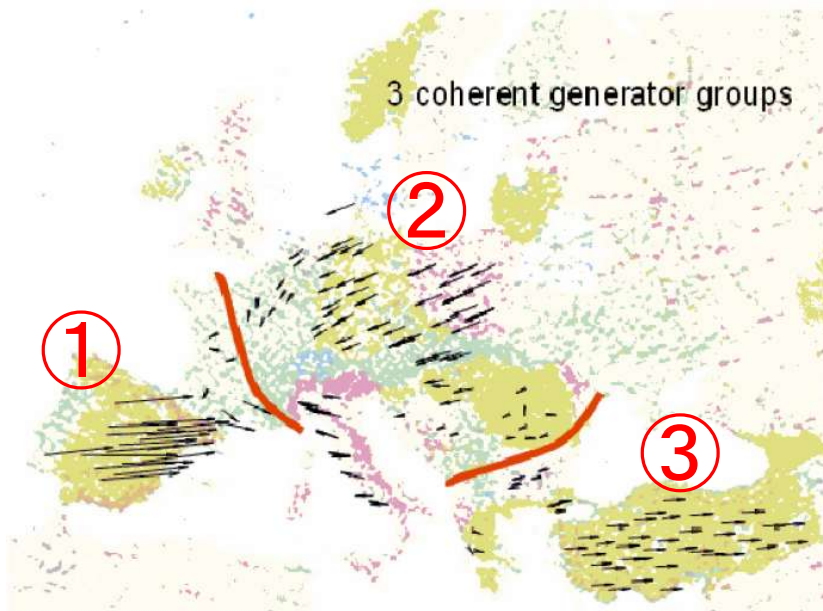
ある地域の
複数の発電機
全体が脱調

↓
当該地域を
左側と切り離す
必要がある

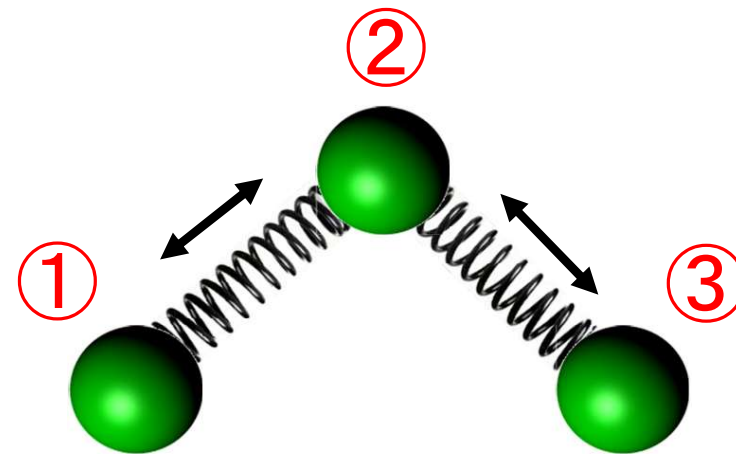
欧州大での広域動揺

- 欧州大の広域動揺の一つとして、イベリア半島の系統（発電機群）と他の系統（発電機群）との間の0.15Hzの動揺が知られている
- 2016年12月にこの広域動揺による動揺現象が、実際に観測されている

欧州大での3つの発電機のグループ



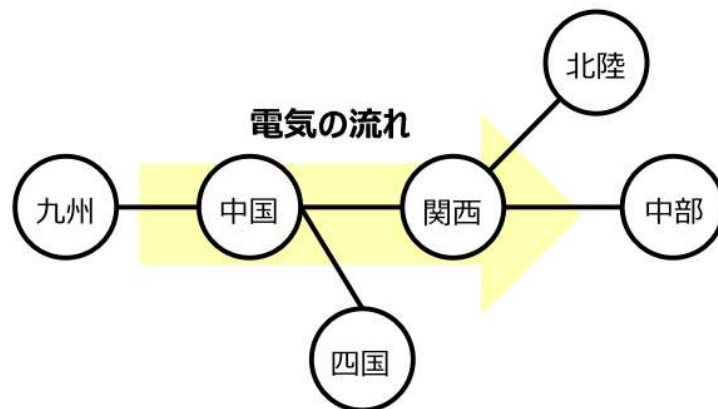
3つの錘とばねでのアナロジー



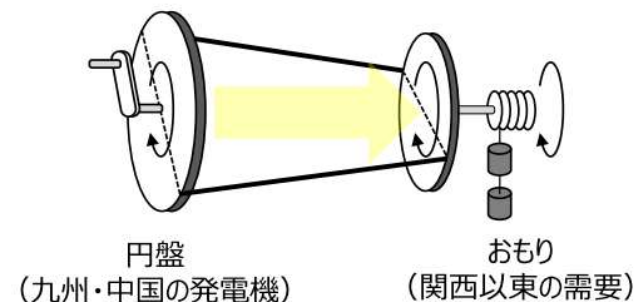
参考：日本での広域動揺

- 日本でも広域動揺は存在する
- 例えば、60Hz連系系統の長周期電力動揺

- また、同期安定性制約は、必ずしも単一送電線のみを対象とした制約という訳ではなく、理論上は同期連系系統であれば生じる可能性がある。
- 実際に、西日本の60Hz連系系統は長距離交流くし形系統であることから、数秒程度の地域間をまたぐ長周期電力動揺（中西安定度の問題）が存在しており、電力系統に想定し得る故障が生じた際には、この電力動揺が増大し、不安定となる（中西全体の系統間脱調が発生する）可能性がある。
- そのため、N-2故障（次頁参照）において、60Hz連系系統の同期安定性が維持できるよう、60Hz連系系統の西から東向きの潮流に対する安定度指標として、西九州変電所（九州）と西播変電所（関西）の500kV母線電圧の位相角の差（中西運用目標相差角）を設定し、実運用において、超過しないよう監視している。
- 中西運用目標相差角を超える場合には、発電機態勢の変更（電源持ち替え）等により上限値以内となるよう調整がなされている。



西日本60Hz（交流）連系系統概略図

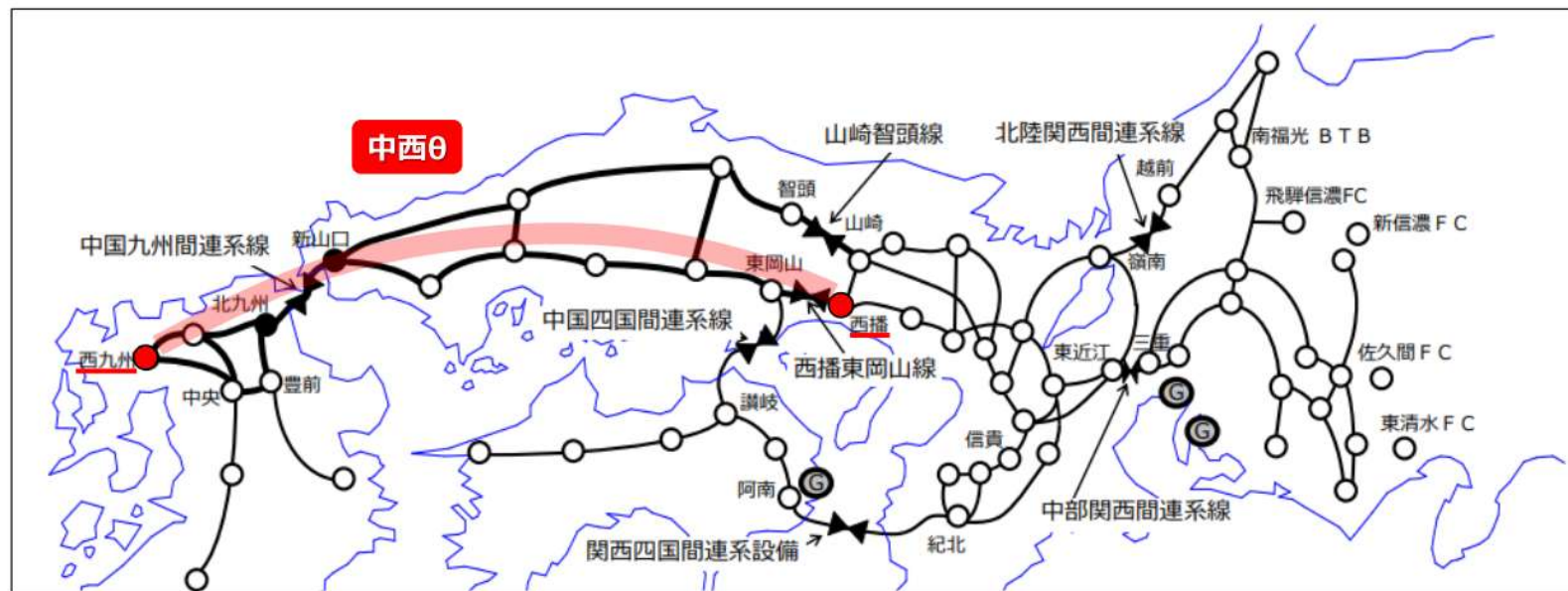


力学系モデルでのイメージ

参考：広域動揺への対応

■ 広域動揺は連系系統大の問題であり，対応も連系系統大で行う必要がある。下図は60Hz連系系統での例

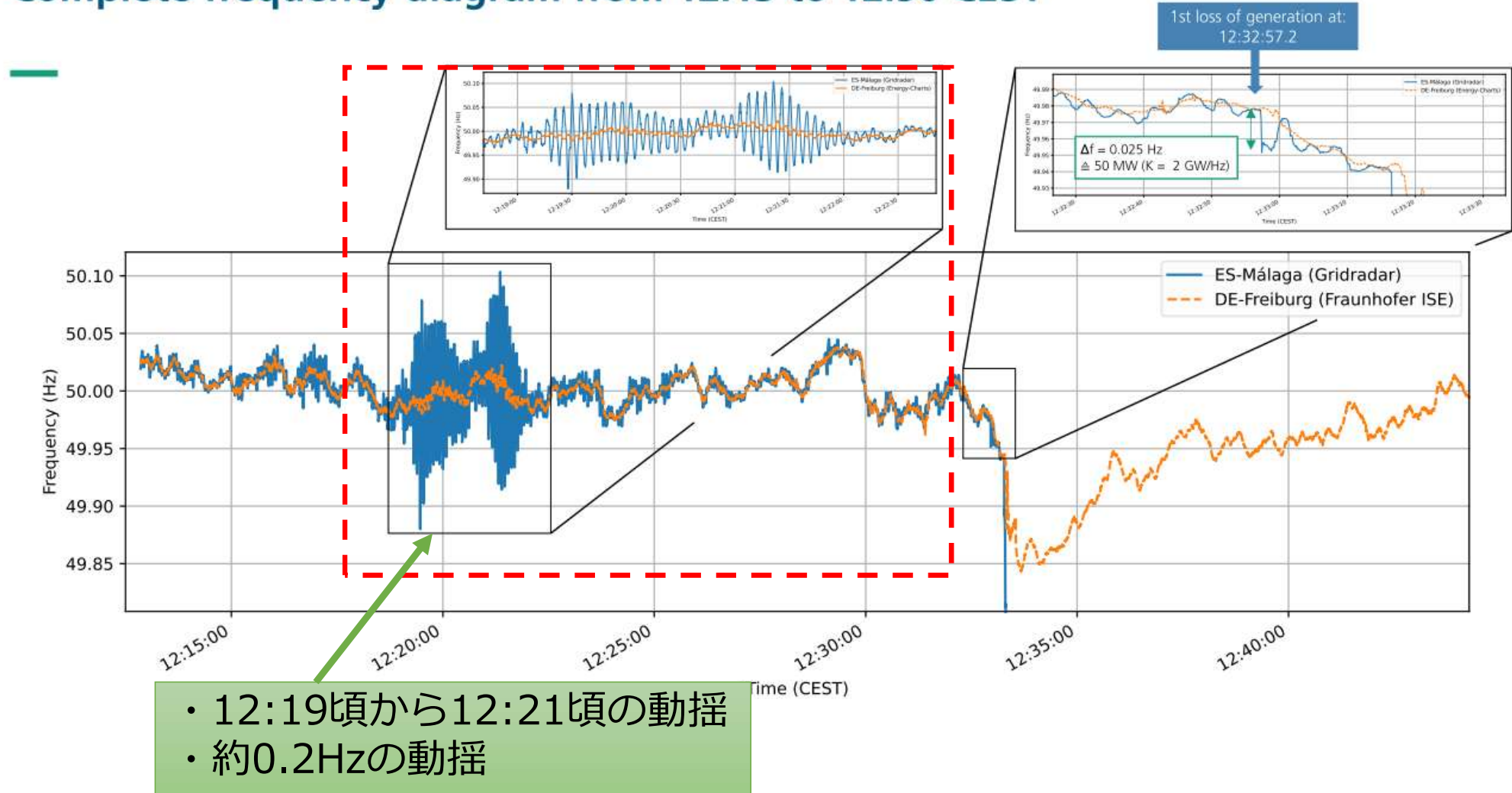
- また、中西安定度は、電気的な位相角重心である関西エリアと大きく振動する九州エリアの位相角差に相関がある（位相差が大きくなると不安定になりやすい）ことが経験則的に分かっている。
- これを踏まえ、西九州変電所（九州）と西播変電所（関西）の500kV母線電圧の位相差を中西 θ と呼称し、中西系統の同期安定性に対する指標としており、また、事前のシミュレーション結果に基づき、中西 θ の運用目標値を設定し、実運用において中西 θ が運用目標値を超過しないよう監視・調整を行っている。



出所) 第4回運用容量検討会(2025年2月12日)資料1-2をもとに作成
https://www.occto.or.jp/iinkai/unyouyouryou/2024/files/unyouyouryou_2024_4_2.pdf

事象前の動揺（フラウンフォーファーISE）

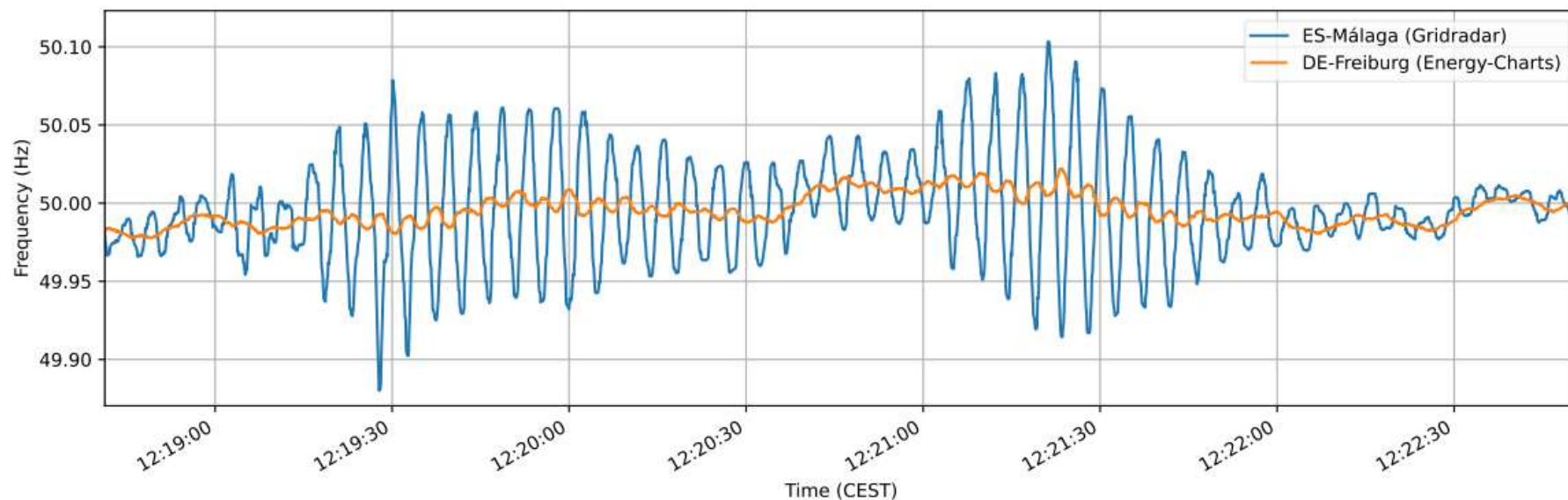
Complete frequency diagram from 12:13 to 12:50 CEST



Fraunhofer ISE, [Frequency analysis - Spanish Black Out on April 28th, 2025](#) を基に作成

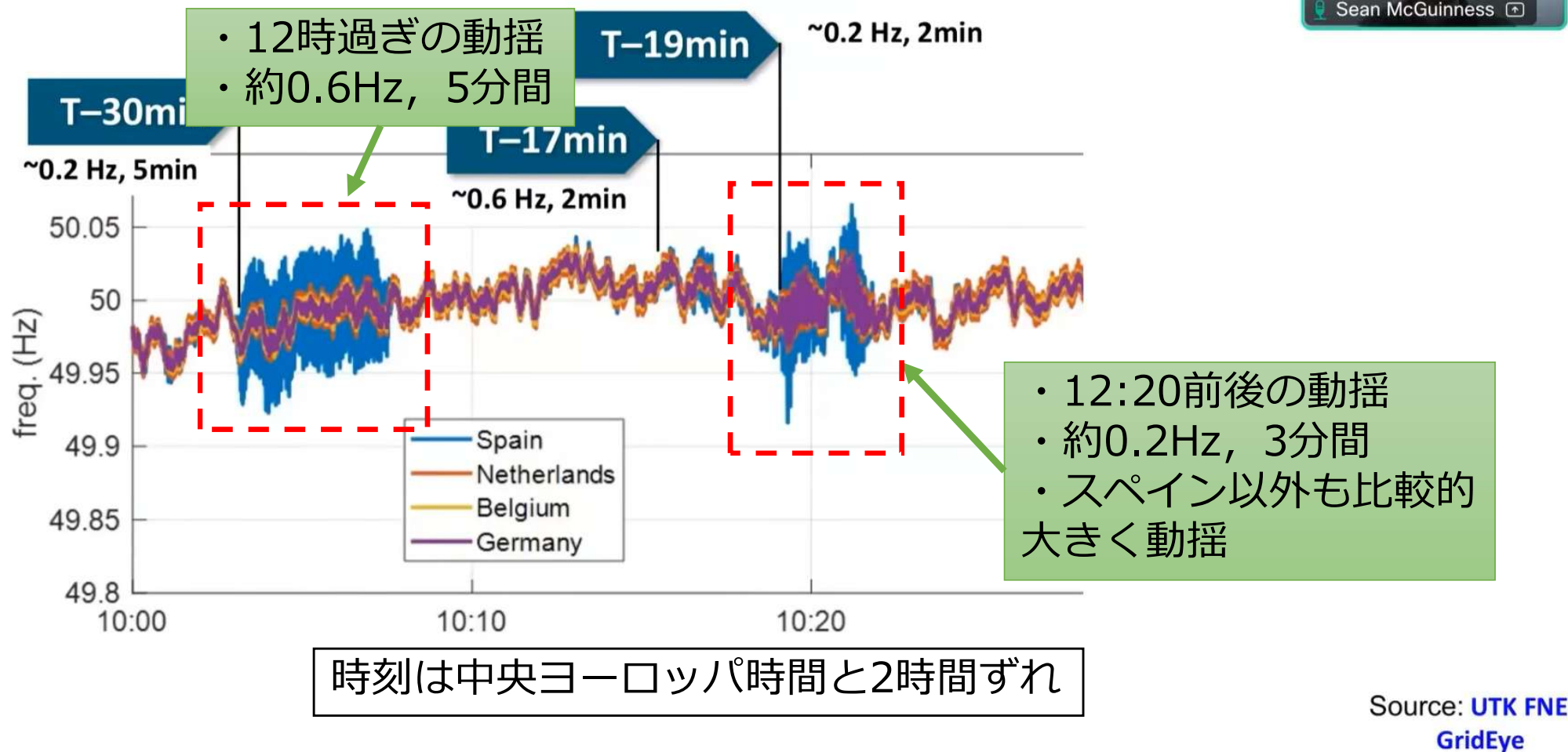
12:20前後の動揺（ブラウンフォーファーISE）

- スペインとドイツを含む大陸中央部の系統との間の系統間動揺，約0.2Hz
 - マラガ（スペイン）とフライブルグ（ドイツ）が逆位相
- スペインの方が動揺が大きく，動揺しやすい状況を示唆
- スペインとフランスのTSOが対応を実施



事象前の動揺 (EPRI)

Pre-event oscillations were noted

EPRI, [Webcast of Initial Findings from April 28, 2025 Iberia Blackout](#) を基に作成

系統間脱調（フラウンフォーファーISE）

Timeline of system break

12:33:16.5 to 12:33:24 CEST

マラガ（スペイン）とフライブルグ（ドイツ）の位相差が拡大
→ ENTSO-Eの「12:33:21での系統間脱調による
交流連系線停止」に対応と思われる

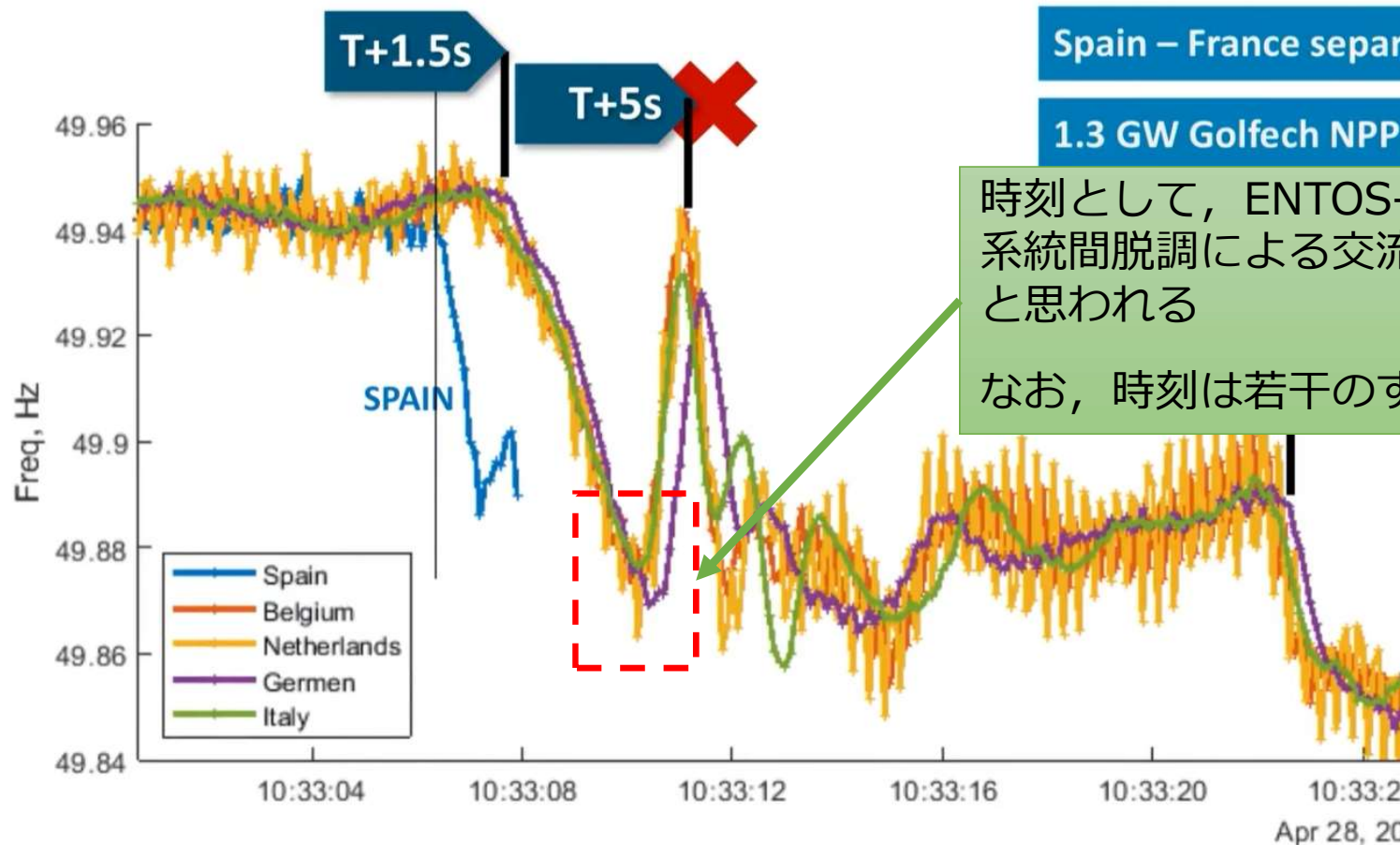


Fraunhofer ISE, [Frequency analysis - Spanish Black Out on April 28th, 2025](#) を基に作成

系統間脱調 (EPRI)

Cascade

Multiple incidents reported

EPRI, [Webcast of Initial Findings from April 28, 2025 Iberia Blackout](#) を基に作成

② スペイン・フランス間での系統間脱調

＜判明していること＞

■ 広域の系統動揺によるものである可能性が高い

- スペインが動揺しやすい状況であったことも示唆されている

＜解明が期待されていること＞

■ 例えば以下の点が考えられる

- 広域の系統動揺の課題に対して、どのような対策が取られていたのか
- 当日の対策・対応はどのようなものであったのか
- 広域の系統動揺での脱調に至った要因は何だったか

③ イベリア半島の系統の全停

➤ **12:33:24**

イベリア半島の系統が完全に崩壊,
スペイン・フランス間の直流連系設備が停止

イベリア半島の全停？

- ENTSO-Eの情報では、以下のように、復旧が**連系線の加圧**と**ブラックスタート機の立ち上げ**から始まっており、全停と考えるのが妥当と思われる
 - 12:44 フランスとスペイン間の400kV送電線（西部）を加圧
 - 13:04 モロッコとスペイン間の連系線を加圧
 - 13:30頃までに、スペインのブラックスタート能力を有する水力（複数）を立ち上げ
 - 13:35 フランス・スペイン間の東部の連系線を加圧
 - 16:11と17:26 ポルトガルのブラックスタート能力を有する2つの電源を立ち上げ
 - . . .

③イベリア半島の全停

- 12:33:21からの3秒間については, ENTSO-Eの情報以外の情報がない
 - 周波数の推移等の情報は見つけられず
- 例えば以下の点の解明が期待される
 - 揚水遮断, 負荷遮断(Automatic load shedding)はどのように動作したのか
 - スペイン・フランス間のHVDCは最後まで停止していないが, どのような動作であったのか
 - イベリア半島内の各部の状況はどのように推移していったのか
 - その結果, イベリア半島内で停電がどのように拡大していったか

解明が期待されること(1/2)

大停電に至るまでのイベリア半島の系統での詳細

- 初期の3度の脱落はどんなものか，原因は何か
- その後，どのような電源の脱落が生じたのか（**Behind the meterのリソースを含む**），原因は何か，**連系技術要件**と整合していたのか
- 揚水遮断・負荷遮断はどのように動作したのか
- 周波数，系統各部の電圧はどのように推移したのか
- 送電線の停止等，ネットワークでどのような事象が，どんな時系列で発生したのか，原因は何か
- 停電はどのように拡大したのか
- スペイン・フランス間のHVDCは最後まで停止しなかったが，どのような設計と動作であったのか

解明が期待されること(2/2)

系統間脱調に関する詳細

- 事前**にどのような**検討・対策**がなされていたか
- 当日の対策・対応**は, どのようなものであったか
- 広域の系統動揺での脱調**に至った**要因**は, 何だったか

系統安定性維持のための能力の確保・管理

- 系統安定性の維持に必要な様々な能力**は, どのように**確保・運用**されていたのか
 - ・需給調整力（ガバナフリー, LFC ほか）
 - ・慣性力
 - ・同期化力
 - ・電圧調整能力 など
- 再エネ電源などの**インバータ電源**からの能力の提供はどうであったか

まとめ

- 4/28のスペイン・ポルトガルの大停電について、「何が起こったか」について、明らかにになっている点、今後の解明が期待される点を紹介した
- なお、本紹介の取り纏めにあたり、PMU^{注)}等で計測された周波数の推移の情報が大変有用であった。これは、多地点での時刻同期がとれた高頻度の計測が「何が起こったか」の把握に有効であることを示している、と考える

注) PMU:電力系統における各地点の電圧・電流・位相の計測情報を、GPSの時刻情報に同期して時系列の計測情報として常時計測する装置

IR 電力中央研究所

参考：イベリア半島の系統



スペイン・フランス間連系：

- ・ AC 4ルート
(400kV, 225kV)
- ・ HVDC

この他、2028年運開
予定で新規HVDCを
建設中

これまでの最大需要：

- ・ スペイン 45,450MW
(2007/12/17)
- ・ ポルトガル 9,888MW
(2021/1/12)

基幹送電線：

400kV (赤) および220kV (緑)

スペイン・モロッコ間連系：

AC 2ルート (400kV, 海底ケーブル)

参考：スペインREEが公表している当日の需給状況

