

不確定環境に対応するスマートグリッド のロバスト信頼度と需給制御技術

餘利野 直人（広島大学）

2014年10月23日

明治大学 中野キャンパス

文部科学省拠点事業MIMS「現象数理学」共同利用・共同研究拠点 共同研究集会 V1.3

「スマートグリッドのモデル化とシミュレーション技術」



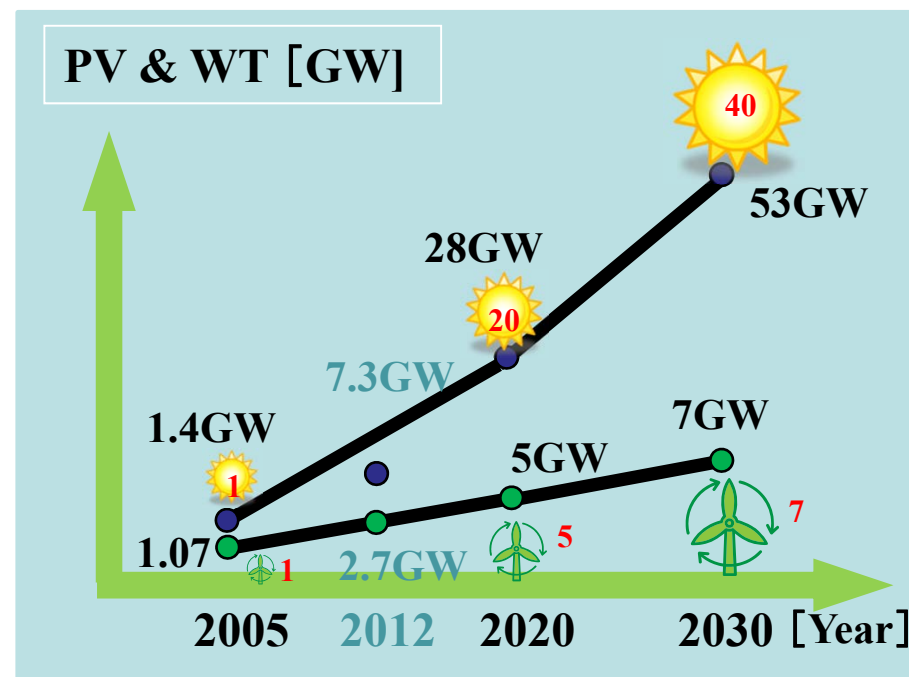
背景

不確定性の増大

- ・太陽光、風力発電
- ・電力自由化

課題

- ・周波数問題
- ・需給調整問題
- ・信頼度問題
- ・電圧問題



不確定性の取り扱い

1. リアルタイム再計算による予測誤差の排除
2. 確率論と確定論の使い分け

影響が重大でない制約
確率論的アプローチ

確率論的データ解析
(母線注入量の確率分布)

- 分散, 共分散, キュムラントの利用
- 線路過負荷の確率モデル

重大な不安定要因
確定論(ロバスト信頼度)

重要パラメータの安全サイド設定
(再エネ総出力範囲)

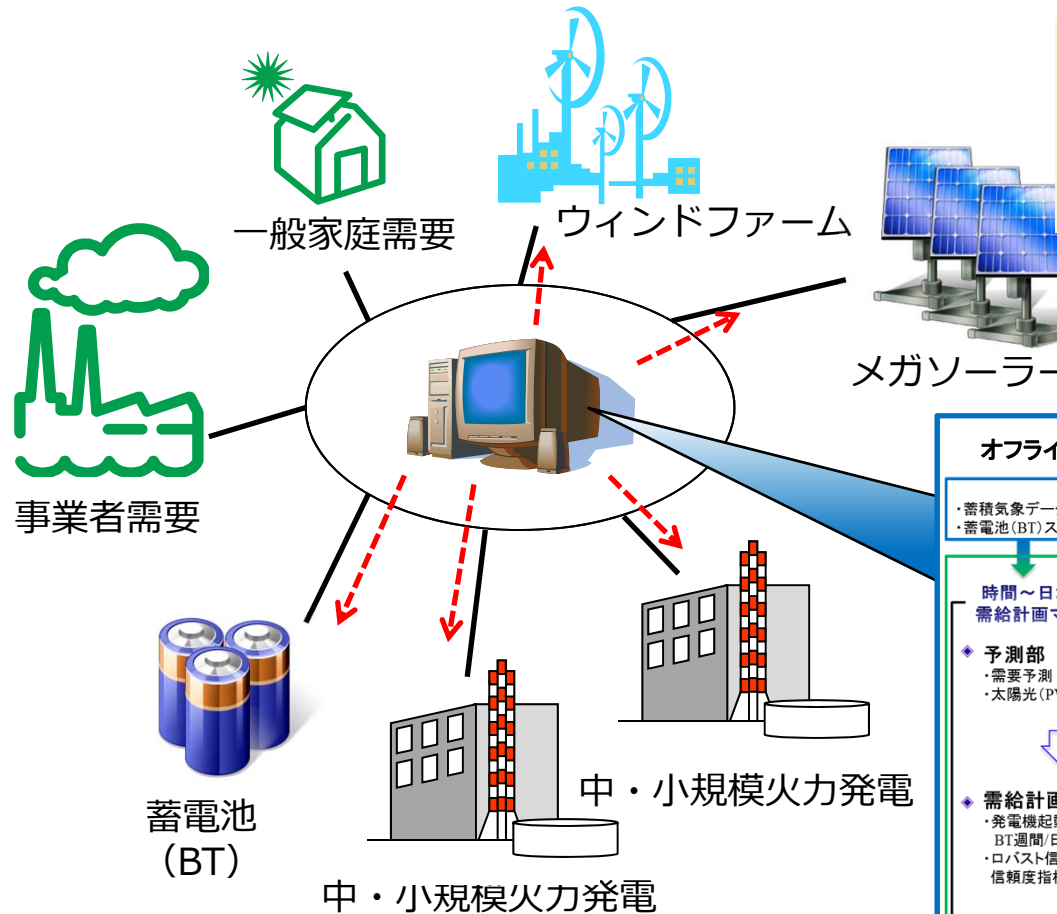
- パラメータ信頼区間 (CI)
- ロバスト信頼領域

需給マネジメント技術 (運用計画 + リアルタイム運用)

- 需給バランスに対するロバスト信頼度(100%の安全性)
- 過負荷に対する確率的安全性

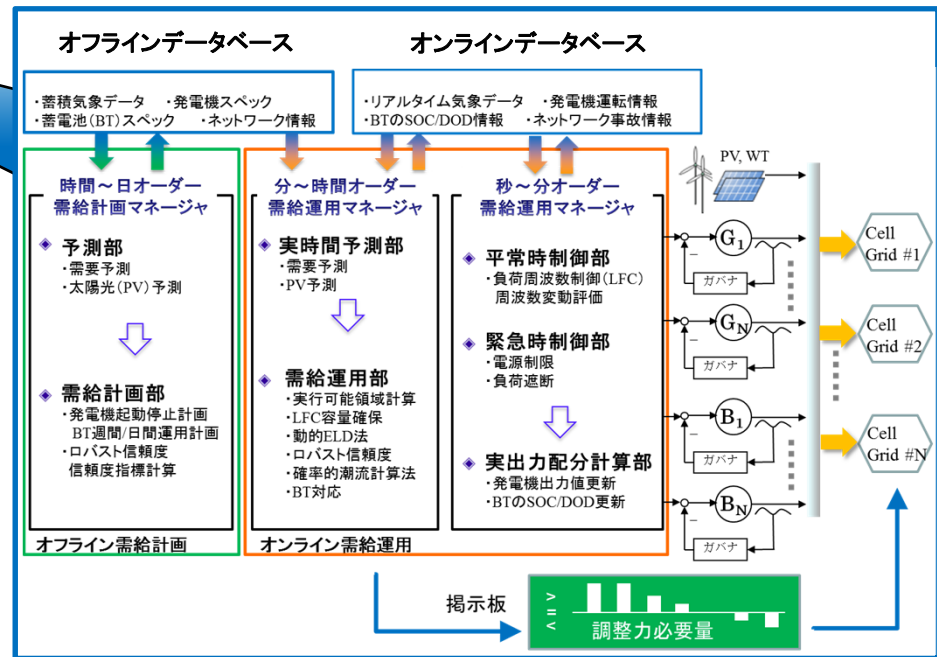
不確定システムの信頼度維持

電力需給マネージャ



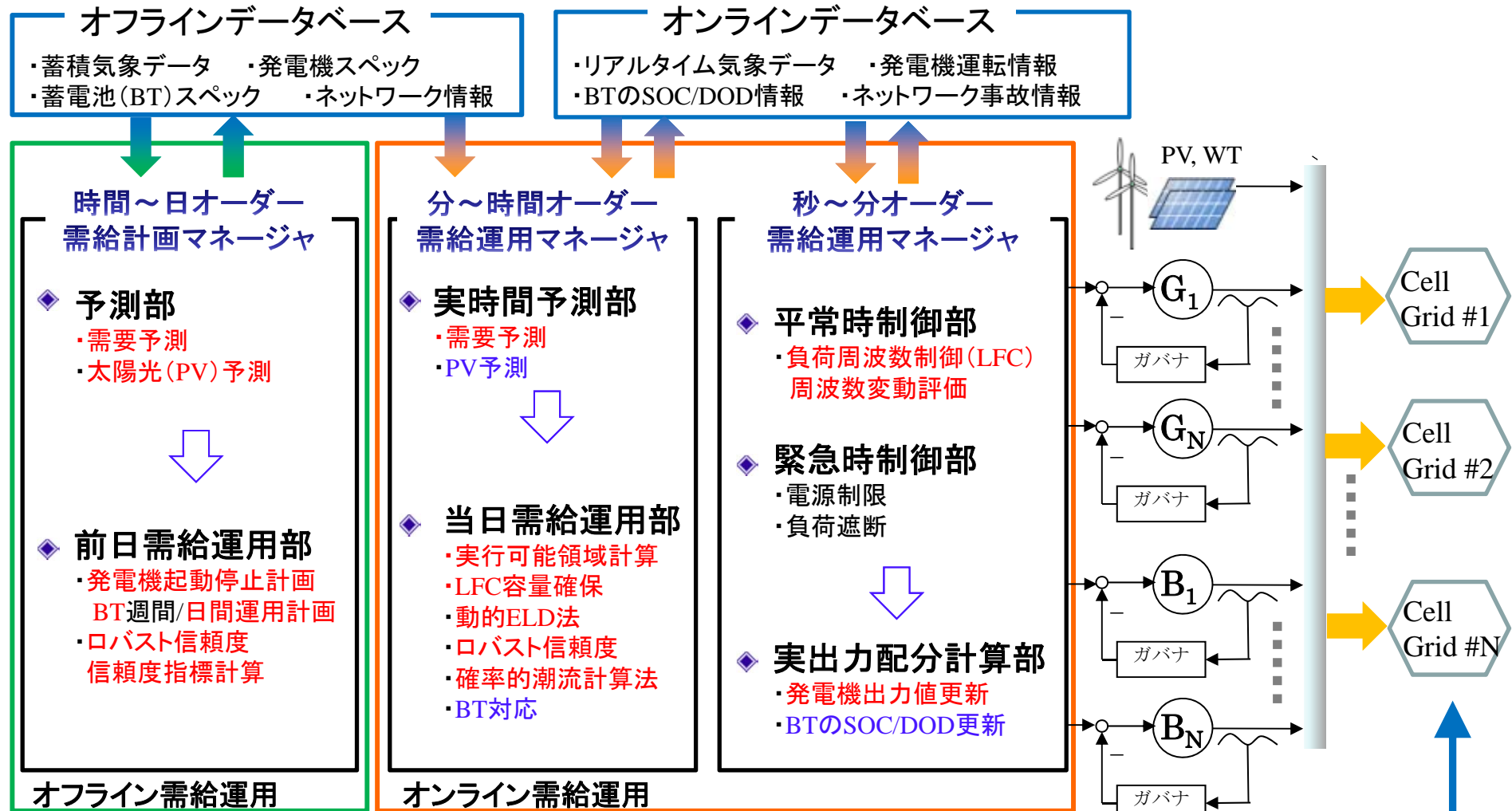
- ・開発プログラムの管理
- ・従来法の有効活用
- ・新規研究テーマの開拓

電力需給マネージャ



需給マネージャが既存調整力を制御しながらRESに対応する

電力需給マネージャの概要



赤: ほぼ開発済
 青: 開発中
 黒: 検討段階

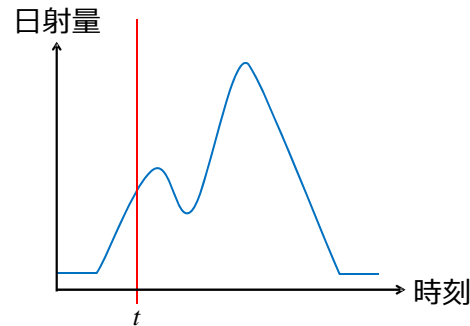
掲示板



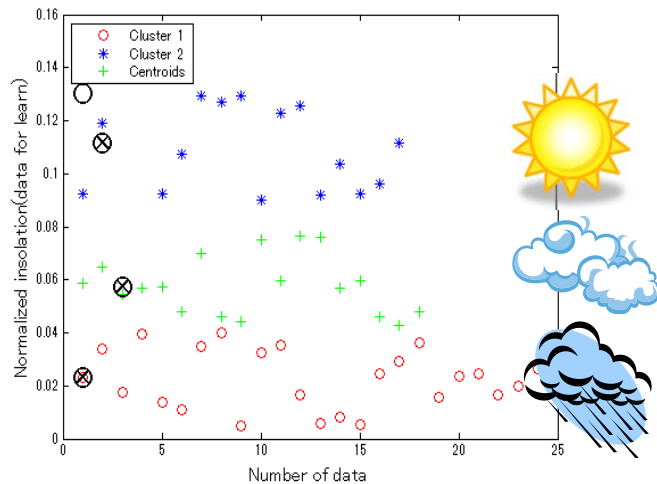
前日予測部 (PV発電量予測)

発電機の起動停止計画時に必要な30分オーダーのPV発電量を予測する(24時間48断面)。30分刻みでニューラルネットワーク(NN)を生成し、天気予報から得られた予測対象日についてのデータを入力して予測を行う。

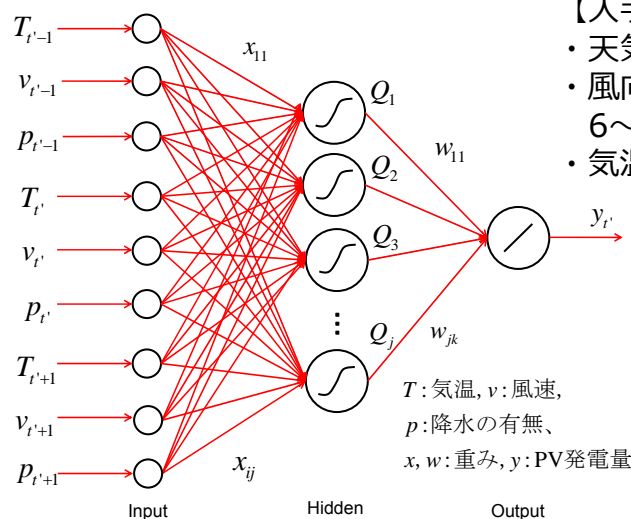
(1) 過去の気象データを各時間断面で抽出



(2) 天候分類(Weather Clustering)により、過去の気象データを日射量を基に晴、曇、雨の3グループに分類



(3) 天候毎にNNを作成

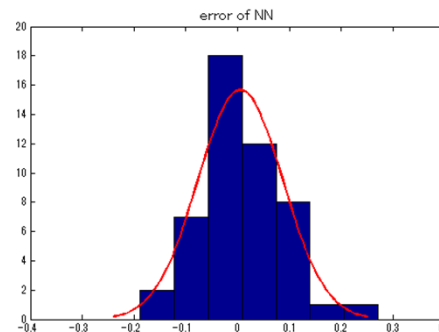


気象庁天気予報 (地域時系列予報)

【入手可能データ】

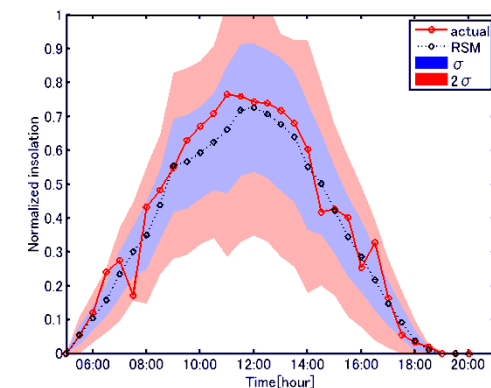
- ・天気 (晴、曇、雨、雪)
- ・風向風速 (風速を0~2m/s, 3~5m/s, 6~9m/s, 10m/s以上の4段階)
- ・気温 (1℃単位)

(4) 構築されたNNを用いて、誤差の標準偏差を計算



(5) 天気予報に応じてNNを使い分ける。

(6) 予測誤差から算出された標準偏差 σ とその2倍の 2σ に対して信頼区間を設定



前日から当日までの需給制御の流れ

前日

前日予測データ



オフライン起動停止計画
30分刻みで24時間分

起動停止の順位
起動停止の時間
BT充放電パターン
決定

オンライン起動停止計画
5分刻みで24時間分

起動停止の時間
更新

当日

当日予測データ



ダイナミック経済負荷配分
(DELD)

5分刻みで60分先までの出力配分

リアルタイム出力配分
決定

前日需給運用部 (発電機運転計画の定式化)

発電機の燃料費最小化

目的関数

発電機の燃料費関数

起動の予熱に必要な
燃料費 (起動費)

$$\min : F = \sum_{k=1}^{N_G} \sum_{t=1}^T \{a_k P_k^2(t) + b_k P_k(t) + c_k u_k(t)\} + \sum_{k=1}^{N_G} (u_k(T_p) - u_k(T_n)) suc_k$$

(a, b, c : 火力発電機のコスト係数, P : 火力発電機出力, u : 起動停止変数,
 T_p : 最大需要時刻, T_n : 最小需要時刻, suc : 火力発電機の起動費)

ペナルティを追加した目的関数

ペナルティ項

$$F = \sum_{k=1}^{N_G} \sum_{t=1}^T \left[a_k P_k^2(t) + b_k P_k(t) + c_k u_k(t) + \mu_0^{-d+2} (d+2) \{\mu_k(t)\}^d u_k(t) \right] + \sum_{k=1}^{N_G} (u_k(T_p) - u_k(T_n)) suc_k$$

$$\mu_k(t) = \frac{a_k P_k^2(t) + b_k P_k(t) + c_k}{P_k(t)} : \text{発電単価} \quad (d : \text{繰り返し回数})$$

前日需給運用部 (発電機運転計画の制約条件)

◎ 確定的な制約

◎ 不確定性に関する制約

➤ 電力需給バランス制約

➤ ディーゼル発電機 出力上下限制約

➤ 出力変化率制約

➤ 最小連続停止時間制約

➤ 最小連続運転時間制約

➤ 発電機予備力制約

➤ PV発電量の**信頼区間制約**

◎ 解法上の制約

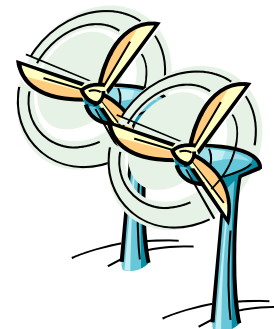
➤ 起動停止変数緩和制約

➤ 起動停止変数時間変化制約

➤ 蓄電池 充放電出力上下限制約

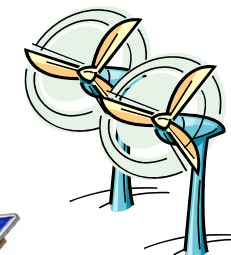
➤ 蓄電池 貯蔵容量制約

➤ ノード間線路潮流制約



RES発電量予測誤差への対応手法

需要値 P_t が $\underline{P}_t \leq P_t \leq \ddot{P}_t$ を満たす範囲内で変動した場合でも、
全ての発電機の起動・停止状態が不変となるようにする



制約条件の追加

- $$\sum_{k=1}^{N_G} P_k^{\min} u_{kt} + B_{dt} - B_{ct} \leq \underline{P}_{tt}$$
- $$\sum_{k=1}^{N_G} P_k^{\max} u_{kt} - R_t + B_{dt} - B_{ct} \geq \ddot{P}_{tt}$$

天候の急変などによる
需要の急増に対応する
ための発電機余力

R_t : 運転予備力+瞬動予備力 } 予備力の考慮

すでに起動している発電機の出力量調整のみで
RES発電量変動および需要値増加に対応可能

需給制御の流れ

前日

前日予測データ



オフライン起動停止計画

30分刻みで24時間分

起動停止の順位
起動停止の時間
BT充放電パターン
決定

オンライン起動停止計画

5分刻みで24時間分

起動停止の時間
更新

当日

当日予測データ



ダイナミック経済負荷配分
(DELD)

5分刻みで60分先までの出力配
分

リアルタイム出力配分
決定

前日需給運用部 (オンライン起動停止: DELDへの適用)

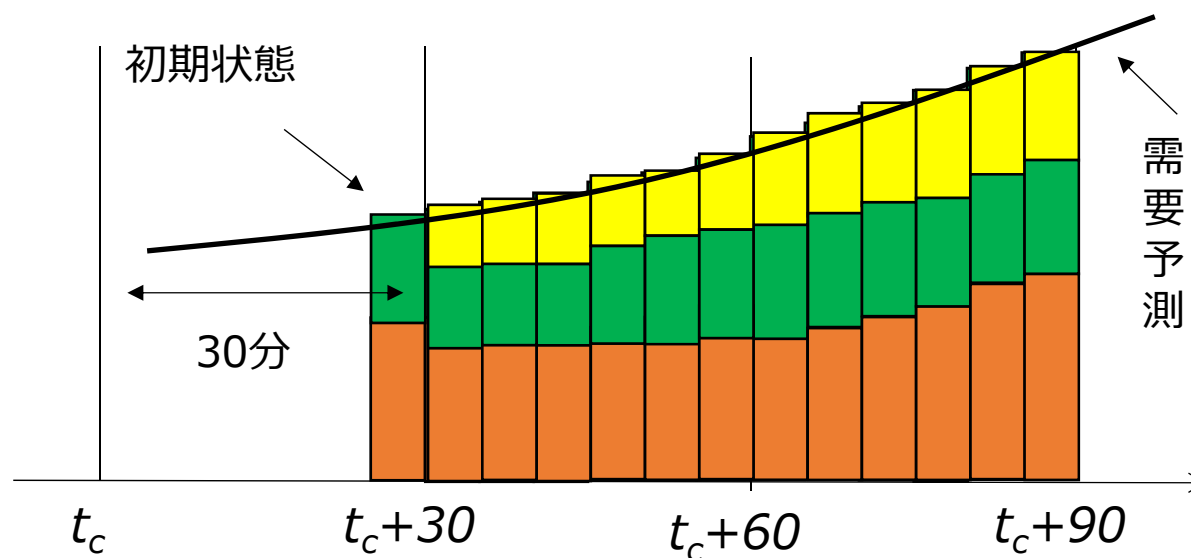
オフライン計画

- ・ 需要増加・減少時間帯における発電機起動停止順序
- ・ 蓄電池残存容量値SOCデータ(30分オーダー)



オンライン計画

運用当日に30分周期で将来30分先から5分刻みで60分間の計画を策定



各機能の説明(翌日起動停止計画)

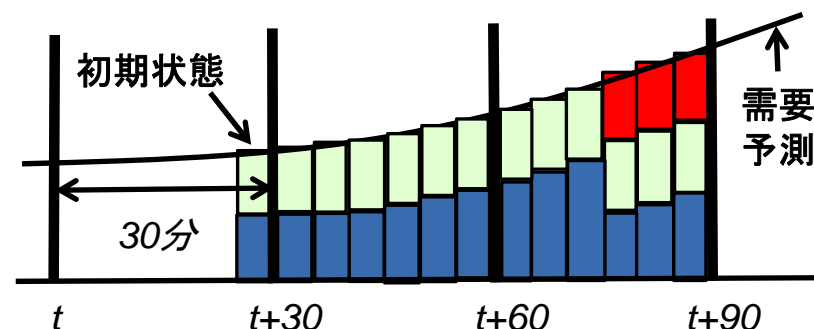
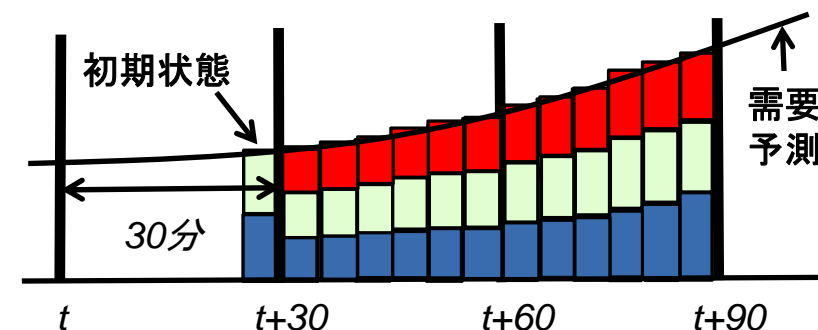
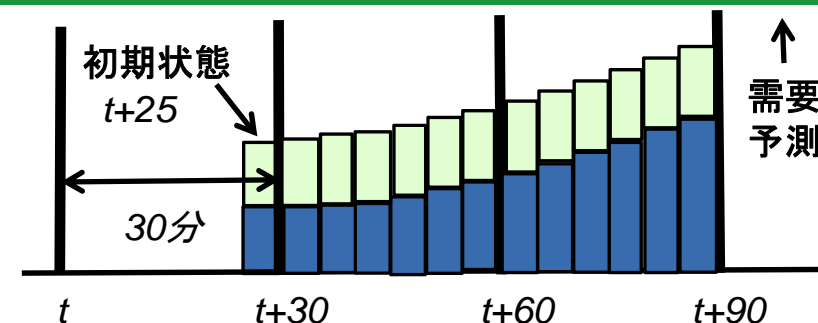
➤初期状態: 起動時刻を決定したい



➤発電機の起動時間をずらしてコストを計算 (最適化計算)



➤5分間隔の電機起動停止計画



需給制御の流れ

前日

前日予測データ



オフライン起動停止計画

30分刻みで24時間分

起動停止の順位
起動停止の時間
BT充放電パタン
決定

オンライン起動停止計画

5分刻みで24時間分

起動停止の時間
更新

当日

当日予測データ



ダイナミック経済負荷配分
(DELD)

5分刻みで60分先までの出力配分

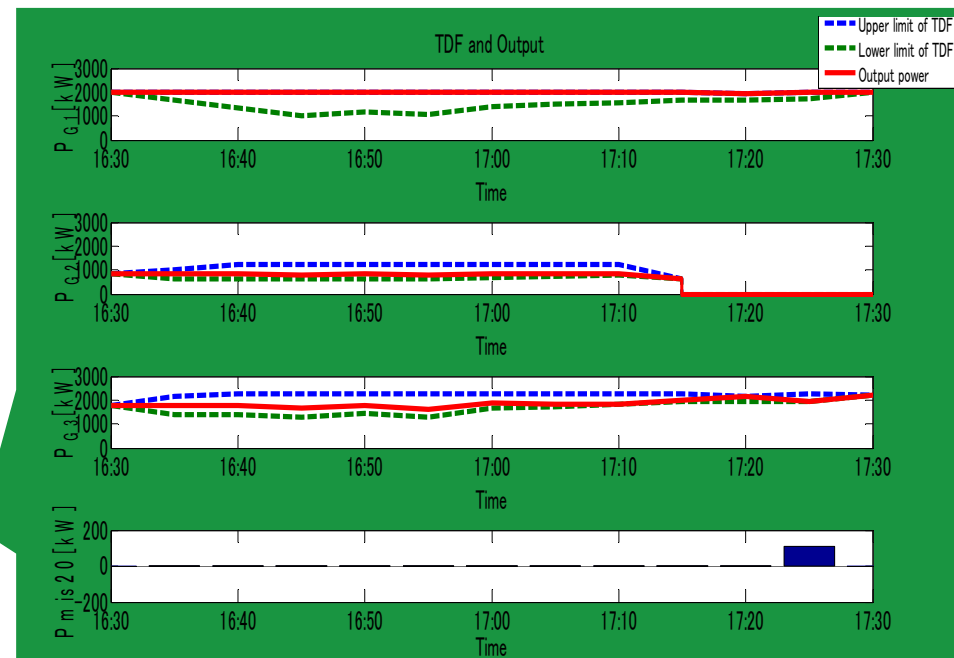
リアルタイム出力配分
決定

ダイナミック経済負荷配分

5分間隔1時間先までの運用計画(5分ごとに更新)

1. 動的実行可能領域(TDF) + 予備力確保
2. 確率論 + 確定論 ダイナミックELD

3. 周波数計算

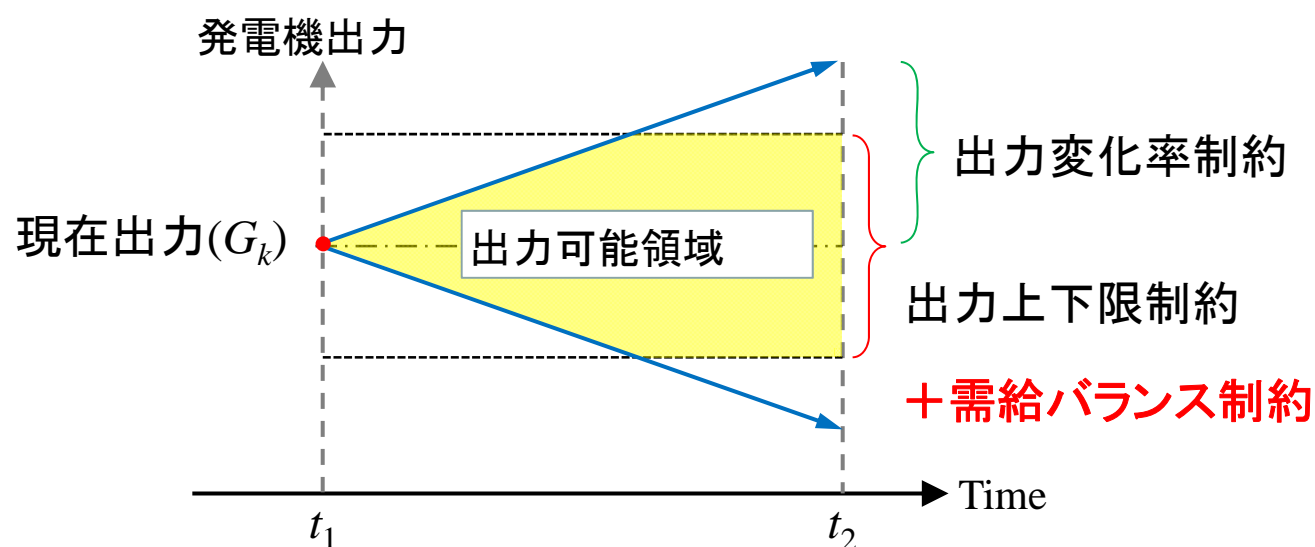


動的実行可能領域TDF

動的実行可能領域 (Time Sequence Dynamic Feasible Region; TDF)

- ・調整電源群に対して、各運用断面の時間的つながりを考慮
- ・不確定性に対してリアルタイムで指定時間先までの予備力確保計画を実現

動的実行可能領域 (TDF)



動的実行可能領域TDFの計算

動的実行可能領域(TDF)の定式化

現在の運用点への過去の運用点からの到達性を考慮した上限値

発電機 k
のTDF上限

$$\overline{\alpha}_{kt} = \min \left\{ \overline{P}_k, \overline{M}_{kt}, \overline{\alpha}_{k(t-i)} + \min(i \times \overline{\delta}_k, \overline{N}_{kt}) \right\}$$

他の発電機によって決まる上限値

発電機の出力行変化率

発電機 k 以外の発電機出力を下限とした場合の発電機 k の出力値

$$\overline{M}_{kt} = \overline{P}_{dt} - \sum_{j=1, j \neq k}^N \overline{P}_j \quad (t = t_1, \dots, T + t_1)$$

総負荷の変化に追従することを前提とした変化率の上限値

$$\overline{N}_{kt} = \left(\overline{P}_{dt} - \overline{P}_{d(t-i)} \right) - \sum_{j=1, j \neq k}^N (-\delta_j) \quad (t = t_1, \dots, T + t_1)$$

対象システムの総負荷(予測誤差考慮)

TDF下限も同様に求められ、上下限の満たす範囲がTDFとなる

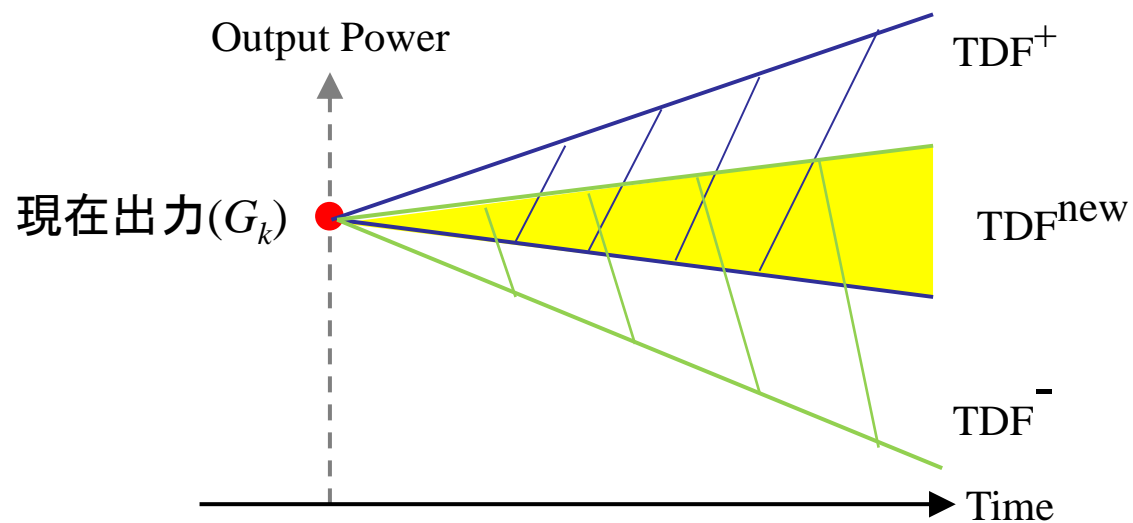
不確定性を考慮したTDF

考え方

- ・リアルタイム予測値によるTDF自体の再計算
- ・予測値上限と予測値下限によるTDF計算

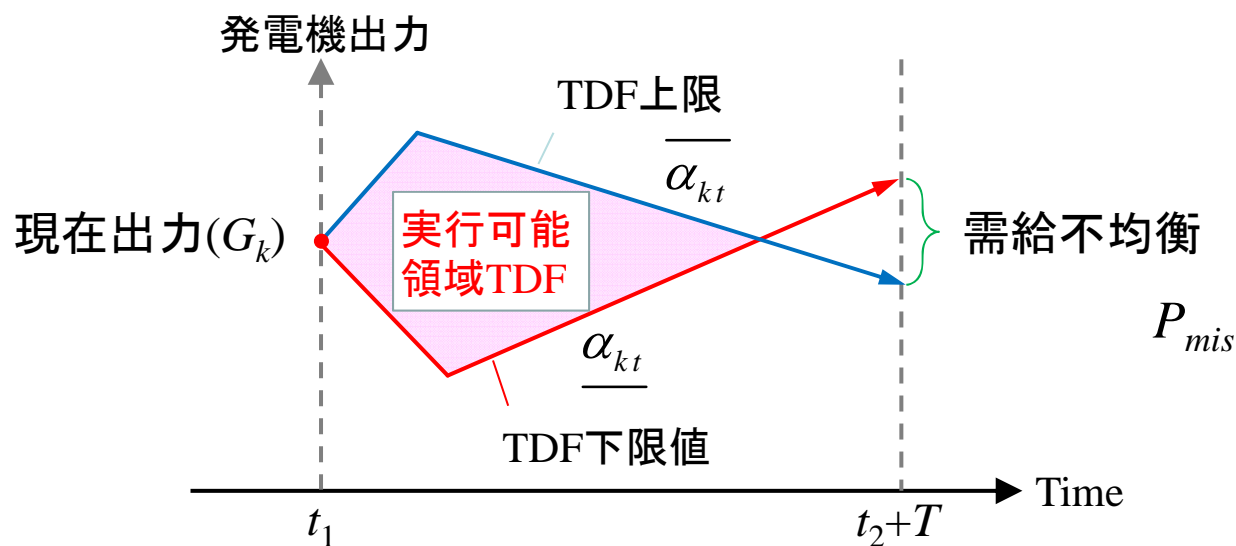


不確定性 (RES 予測誤差) を考慮した TDF



リアルタイムTDF計算と予備力確保

T時刻先までの動的実行可能領域TDFの計算 ⇒ DELDに使用
 TDF上限と下限の反転による需給不均衡の検出 ⇒ 予備力確保



発電機群の出力変化率を超える
 厳しい負荷パターンではTDF上下限が反転

⇒ TDF上下限が反転した場合, P_{mis} を考慮してTDF再計算

動的経済負荷配分の定式化

発電機群の総燃料費が最小となるように5分刻みで最適化

Minimize :

$$f = \sum_{t=t_1}^{T+t_1} \sum_{k=1}^{N_n} \left(\frac{a_k}{2} P_{Gkt}^2 + b_k P_{Gkt} + c_k \right) \quad t = t_1, \dots, t_1 + T$$

Subject to :

$$\sum_{k=1}^{N_n} P_{Gk}(t) = \sum_{k=1}^{N_n} E(P_{Dk}(t))$$

需要の期待値
需給バランス

$$\underline{\alpha}_{kt} \leq P_{Gkt} \leq \overline{\alpha}_{kt}$$

TDF

確率的潮流計算により、
線路過負荷を確率的に
抑制する

$$-\delta_k \leq P_{Gk(t-1)} - P_{Gkt} \leq \delta_k$$

出力変化率上下限

$$-\bar{F}_l + \beta \sqrt{c_{ll}(t) + D_l(t)} \leq \sum_{j=1}^{N_n} S_{lj} P_{Gj}(t) \leq \bar{F}_l - \beta \sqrt{c_{ll}(t) + D_l(t)}$$

線路潮流上下限

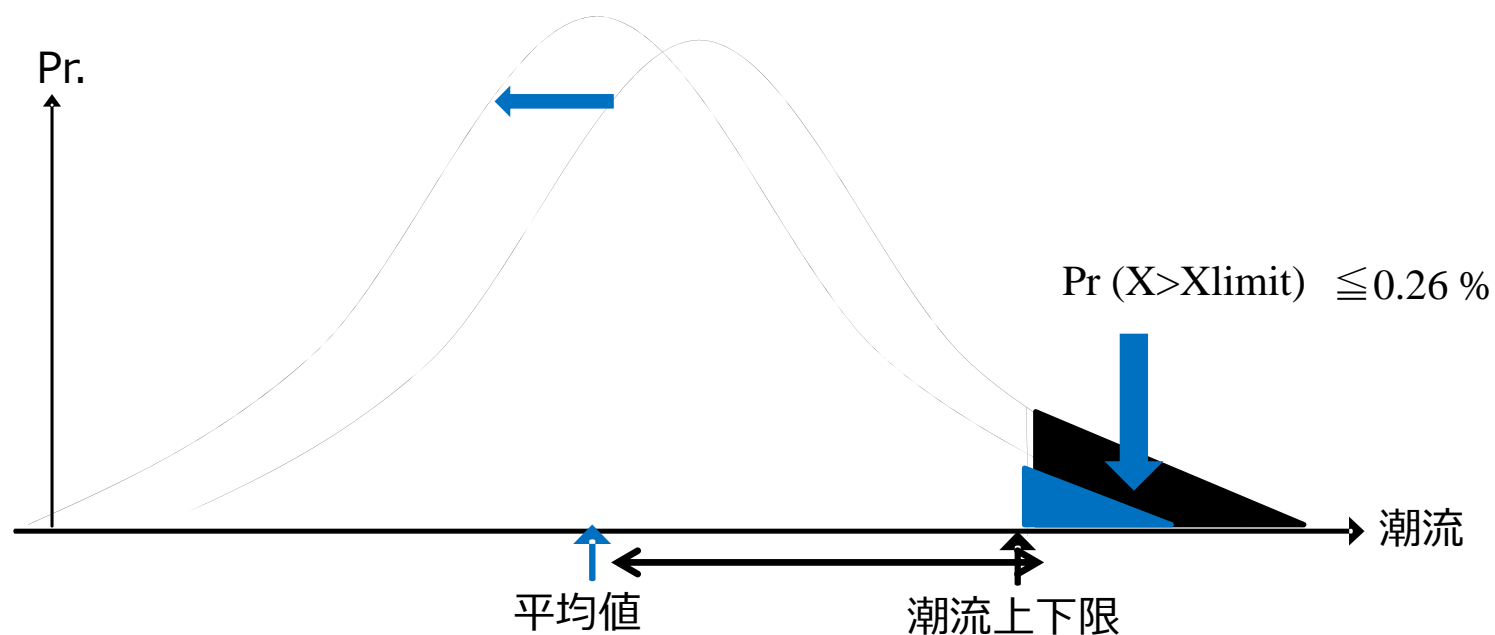
線路過負荷発生確率の考慮

確率的直流潮流計算

仮定) 各ノードPV発電量は正規分布 (予測値と共分散は既知)

直流潮流方程式: $P=J\theta$ 、線路潮流: $F=L\theta$ より θ を消去

$$F = S \cdot P \Rightarrow Cov[F] = S \cdot Cov[P] \cdot S^T = [\sigma_{ij}]$$



直流法による確率的潮流計算

線路潮流 F と発電量 P_G と電力需要 P_D の関係式

$$F = S \cdot P = S [P_G - P_D]$$

$$F \text{ の期待値 } E[F] = S \cdot E[P]$$

$$F \text{ の共分散行列 } Cov[F] = S \cdot Cov[P] \cdot S^T$$

$$P \text{ の期待値 } E[P] = P_G - E[P_D]$$

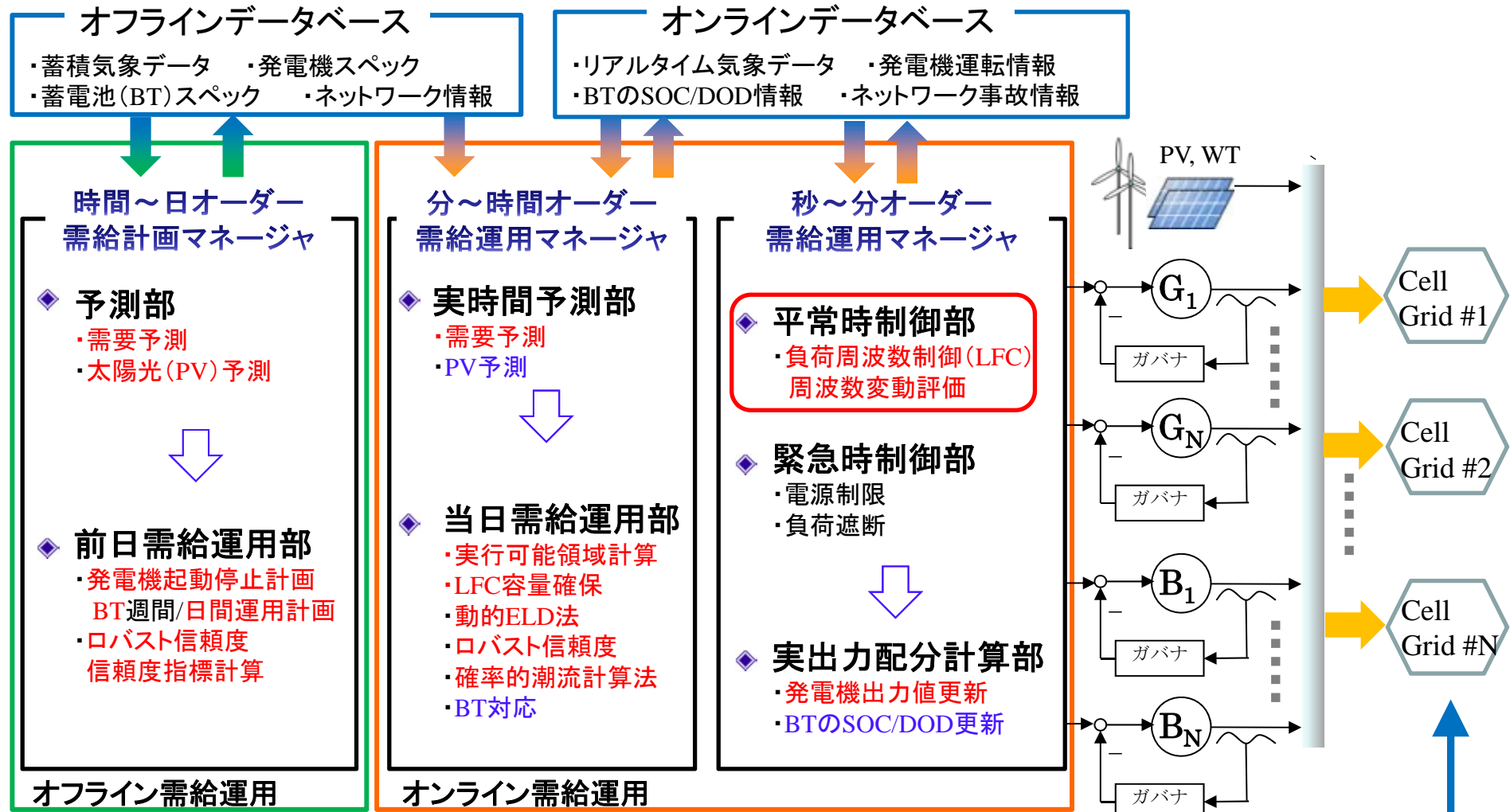
$$P \text{ の共分散行列 } Cov[P] = E[P \cdot P^T] - E[P]E[P]^T$$

線路 l の潮流の期待値 $E[F_l]$

$$E[F_l] = \sum_{j=1}^{N_n} s_{lj} E[P_j] = \sum_{j=1}^{N_n} s_{lj} P_{Gj} - D_l, \quad D_l = \sum_{j=1}^{N_n} s_{lj} E[P_{Dj}]$$

$$Cov[F] \text{ の } (l,l) \text{ 要素を } c_{ll} \text{ とすると, } \bar{F}_l - \beta \sqrt{c_{ll}} \geq |E[F_l]|$$

電力需給マネージャ (再掲)

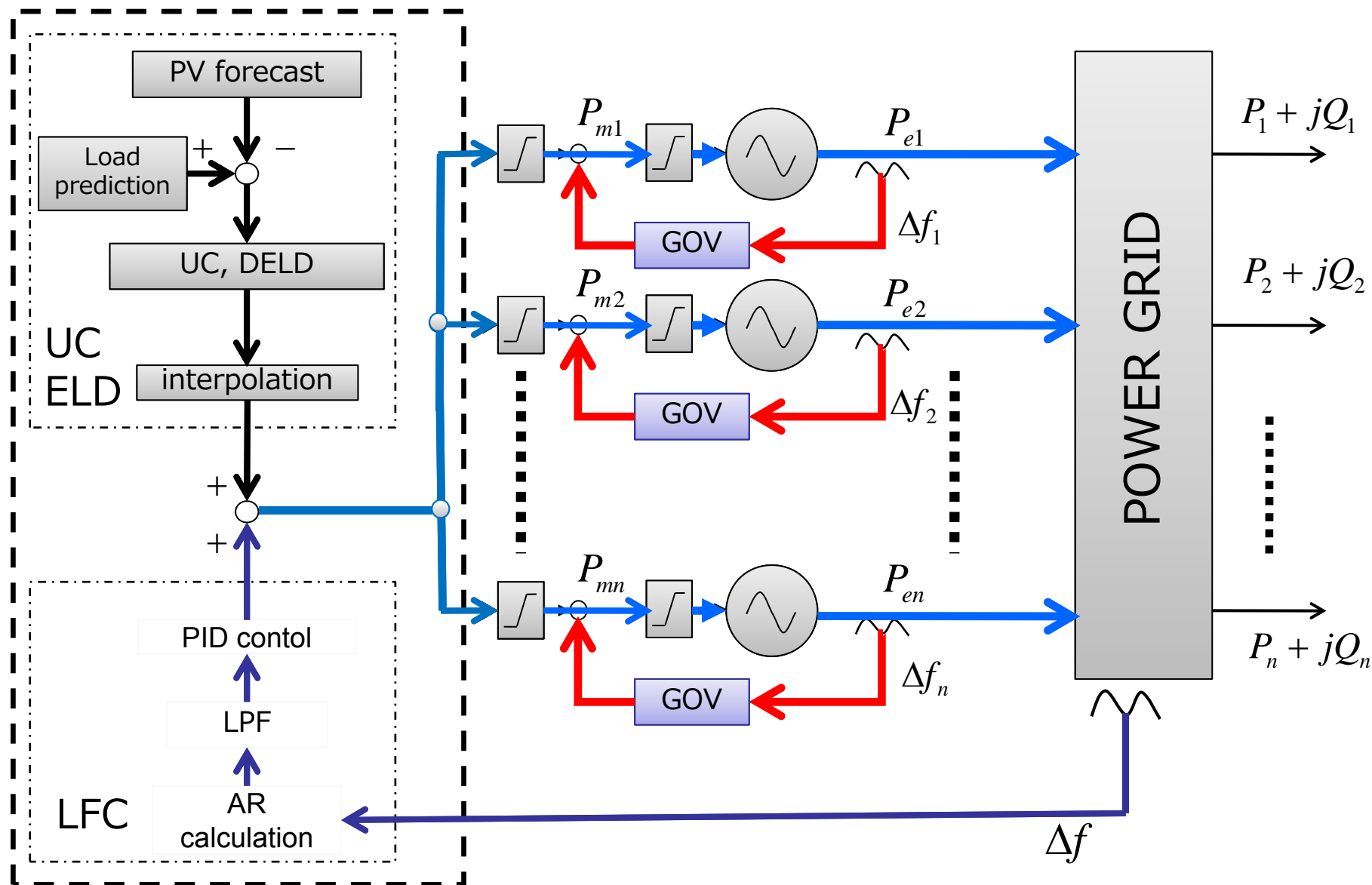


赤: ほぼ開発済
 青: 開発中
 黒: 検討段階

掲示板

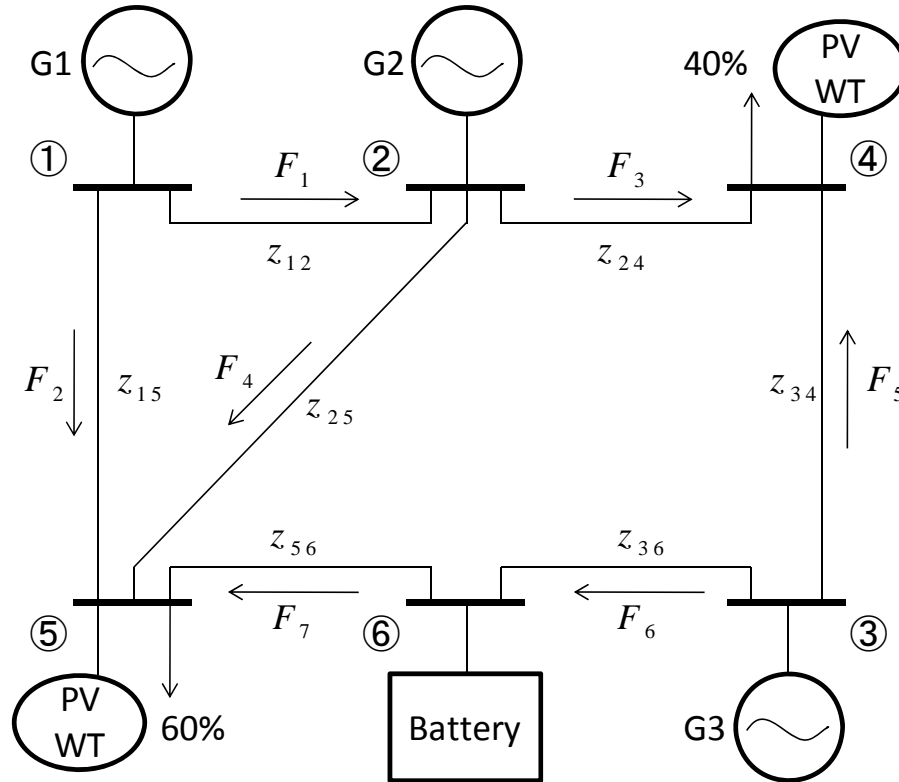


周波数制御の流れ



シミュレーション条件

発電機3機, RES2カ所, BT1カ所のMicro grid



テスト離島系統

線路インピーダンス

	Impedance [ohm]
z_{12}	$0.02+j 0.06$
z_{15}	$0.08+j 0.24$
z_{24}	$0.01+j 0.03$
z_{25}	$0.06+j 0.18$
z_{36}	$0.03+j 0.10$
z_{34}	$0.08+j 0.24$
z_{56}	$0.02+j 0.06$

許容有効線路潮流

	Lower/Upper Limit[kW]
F_1	$-1.675 \sim 1.675$
F_2	$-1.400 \sim 1.400$
F_3	$-1.925 \sim 1.925$
F_4	$-1.450 \sim 1.450$
F_5	$-1.550 \sim 1.550$
F_6	$-1.800 \sim 1.800$
F_7	$-1.825 \sim 1.825$

蓄電池仕様

	Upper Limit [kW]	Battery capacity [kWh]	Efficiency [%]
BT	400	2,400	90

ディーゼル発電機仕様

	Capacity [kW]	Upper/Lower Limit[kW]	Ramp Rate [kW/min]	Start-up Cost	Coefficients of the Generation Cost		
					a	b	c
G1	2,000	1,000~2,000	66.67	4,000	0.0011	16.416	4,320.00
G2	1,250	625~1,250	41.67	2,500	0.0021	17.41	3,677.50
G3	2,250	1,125~2,250	75	4,500	0.0002	20.178	3,933.70

軽油 : 90 [円 / リットル]

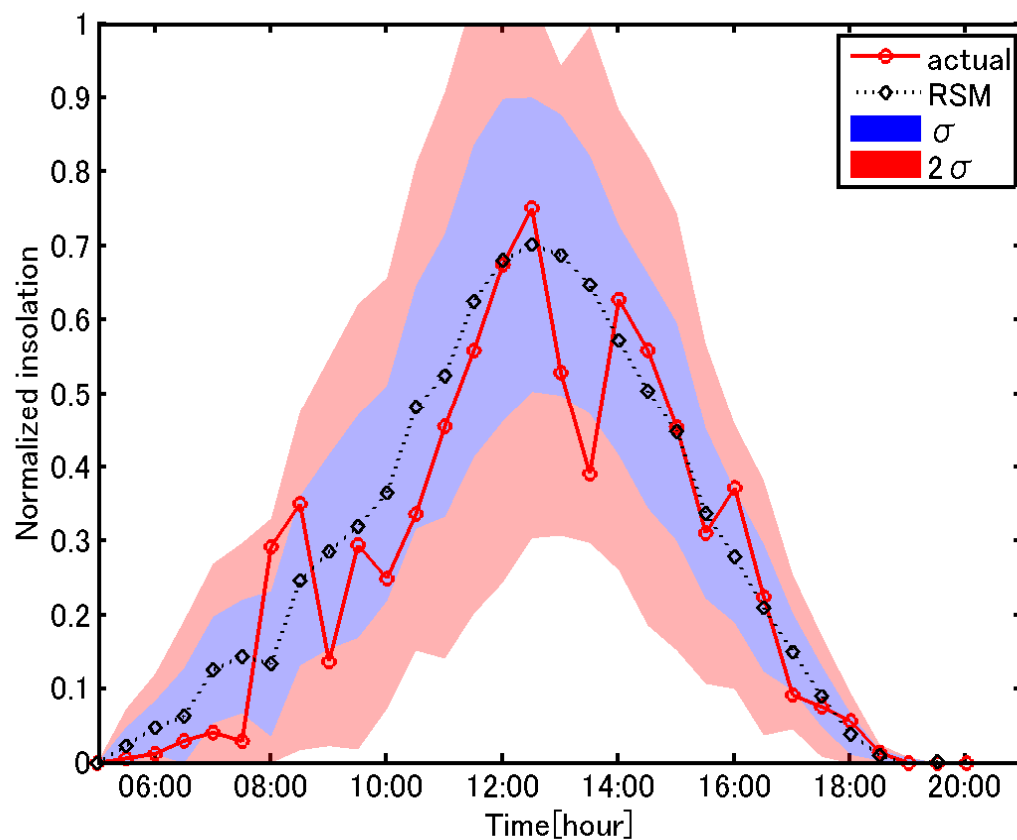
参考 : 山城 迪 : 「直流法による電力潮流最適化」, 電学論B, vol. 97, No. 11 (1977)

参考 : ディーゼルエンジン燃焼特性 <http://www.kohlerpower.com/>

参考 : 新神戸電機 <http://www.shinkobe-denki.co.jp/20.ir/20.20.news/pdf/2010/20100402.pdf>

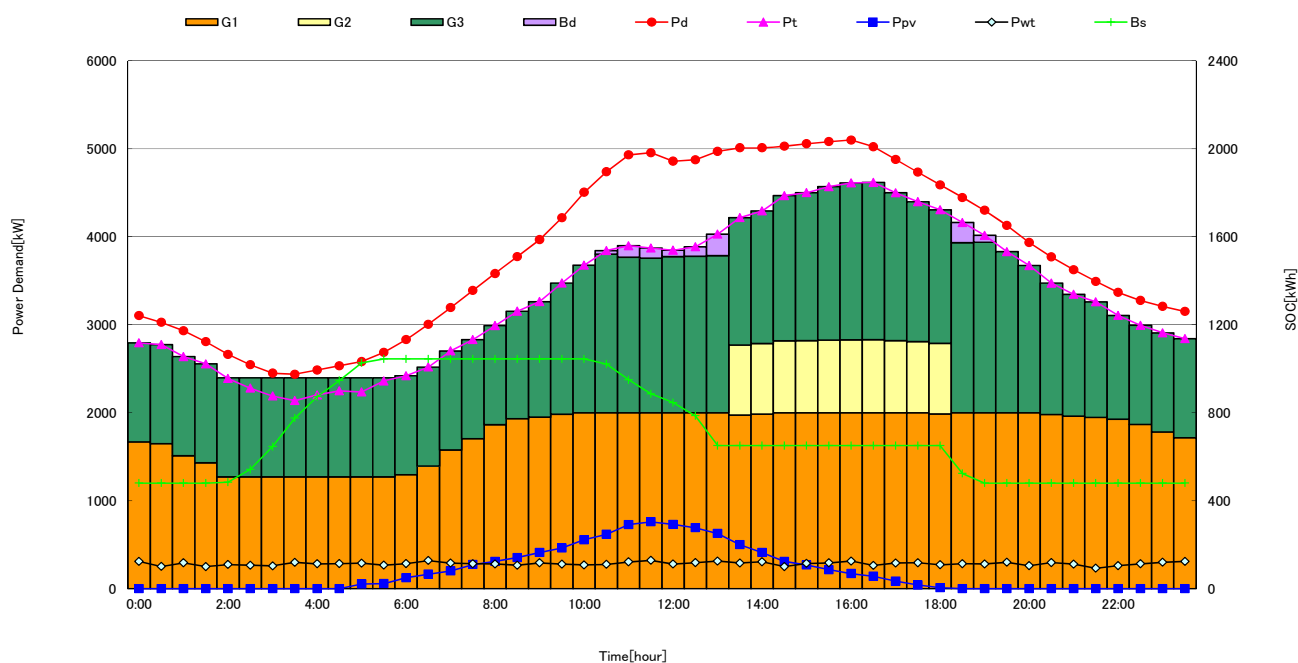
翌日PV予測

比較的発電量が大きい2012年7月12日の日射量予測シミュレーション
 予測誤差から算出された標準偏差 σ とその2倍の 2σ に対して、
 信頼区間を設定



前日起動停止計画(UC) 30分間隔

前日UC (30分間隔)



2012年7月15日前日UC(天候分類なし)

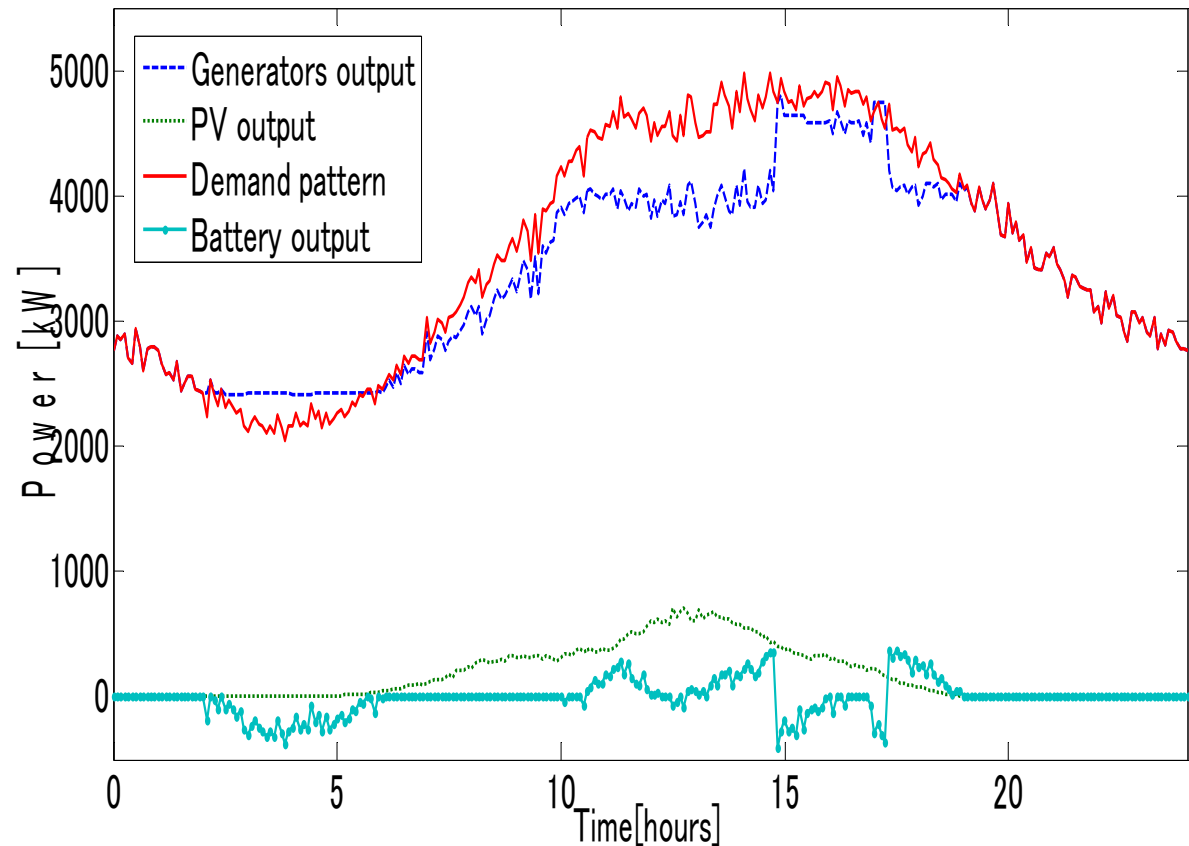
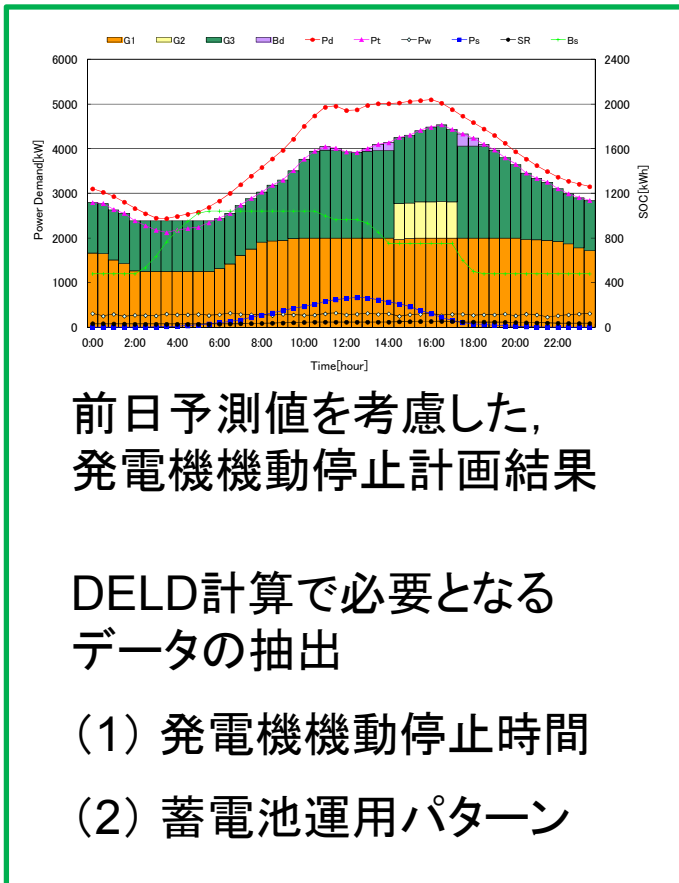
予測精度が高くないとも安定的に解が得られ、燃料費の安い順に発電機出力が配分
 オフライン発電機起動停止計画の発電コスト：1,620,700[円](1:00-23:00)

発電機、BT出力計画(5分間隔)

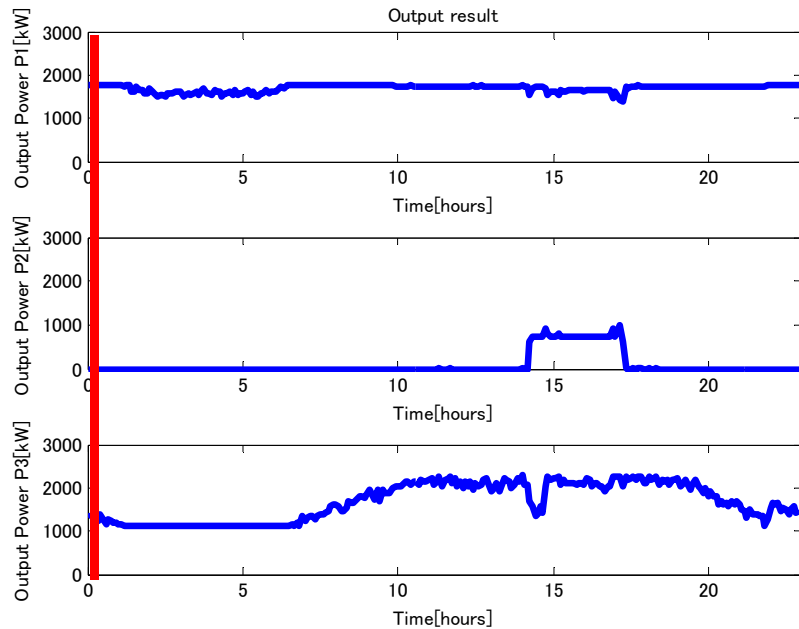
前日UC (30分間隔)



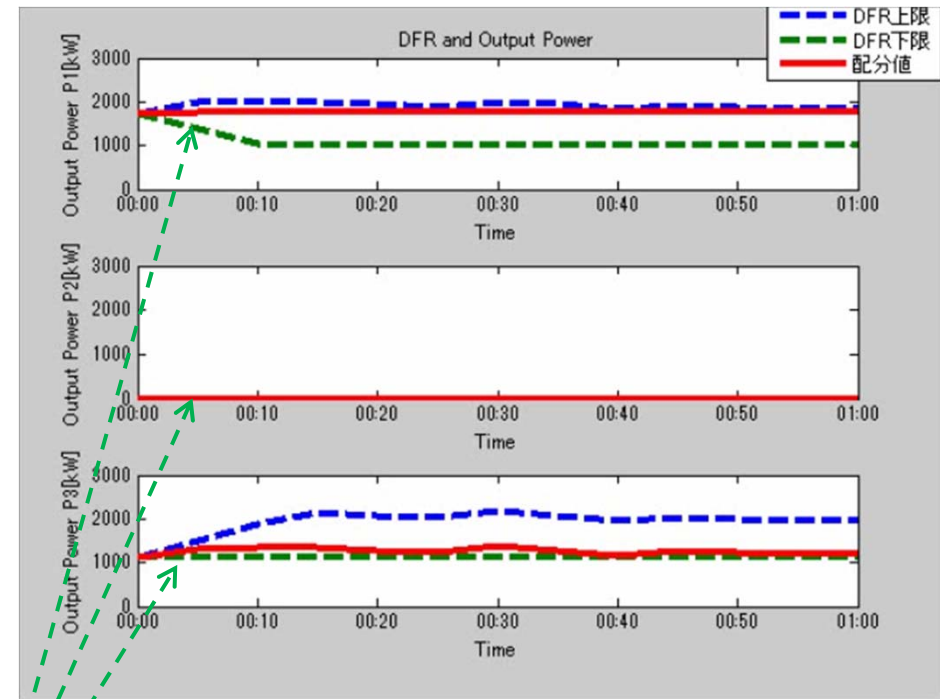
発電機、BT出力計画(5分間隔)



当日ELD (5分間隔、一時間先まで)



各発電機出力値



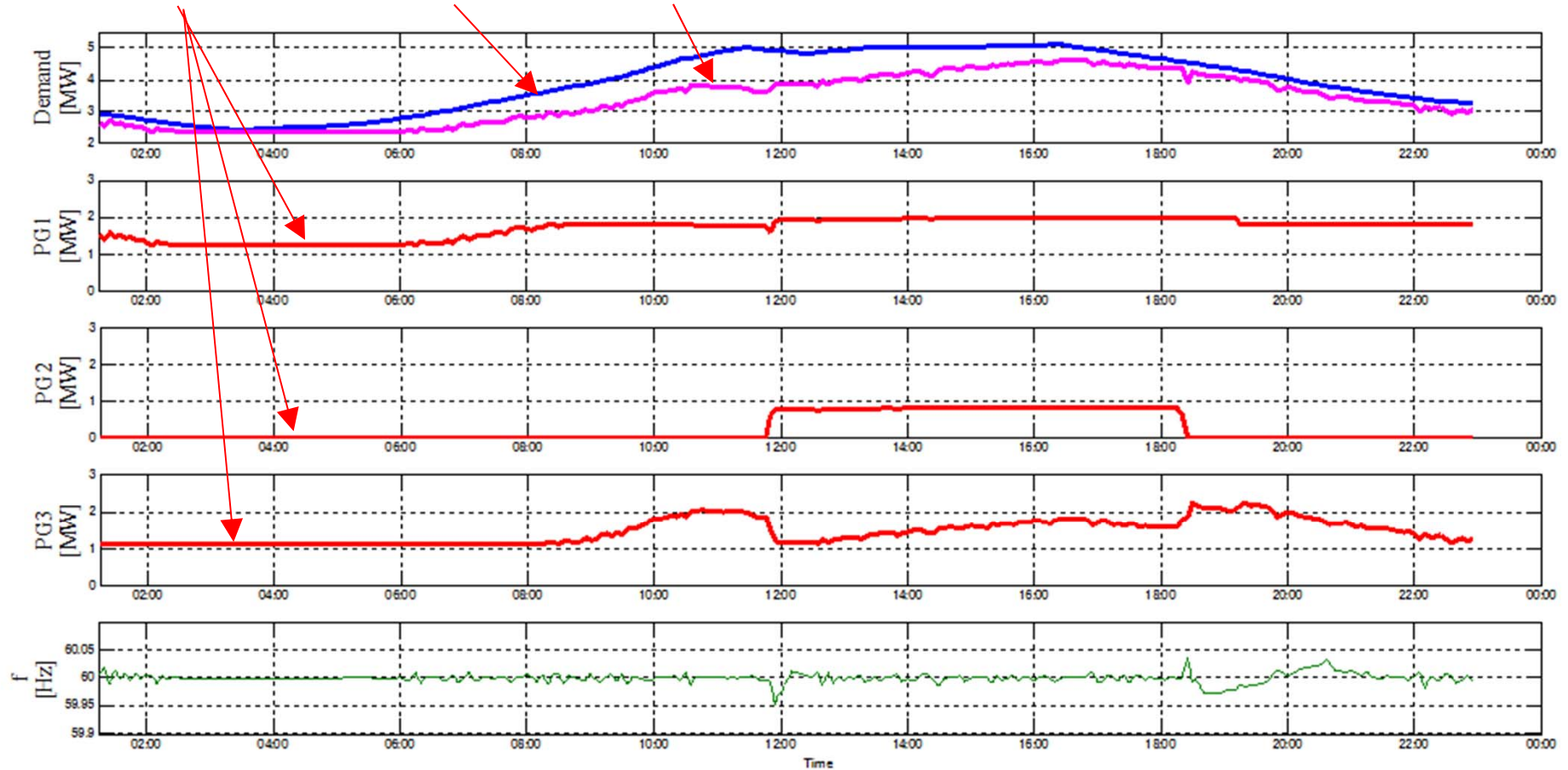
TDF, 発電機出力値

5分先の出力予定値

次の5分後(時刻0:05)の出力指令値

周波数計算

発電機配分値 総需要 総需要-PV,WT出力



仕上がり評価は今後の課題。

ロバスト信頼度の提唱

まとめ

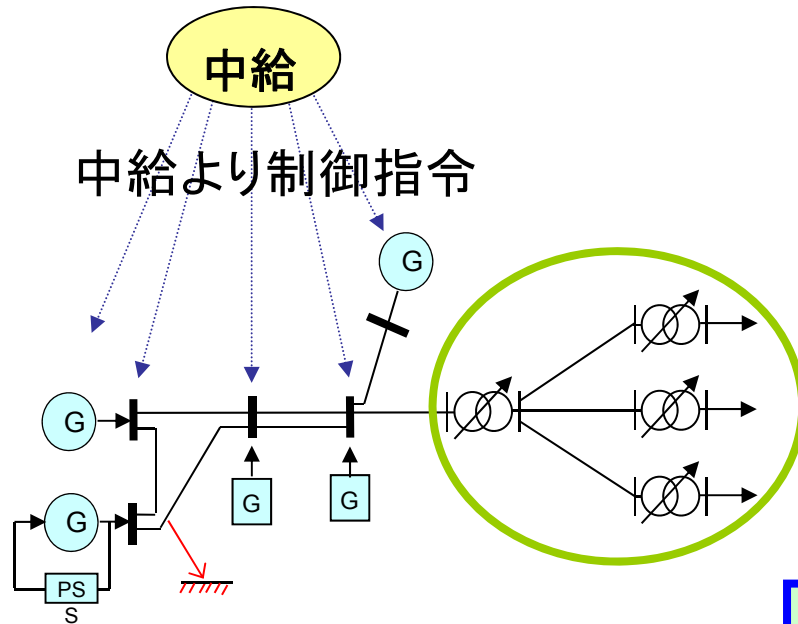
- ・ 周波数維持に対するロバスト信頼度を達成
- ・ 線路制約については確率論的取り扱い

課題

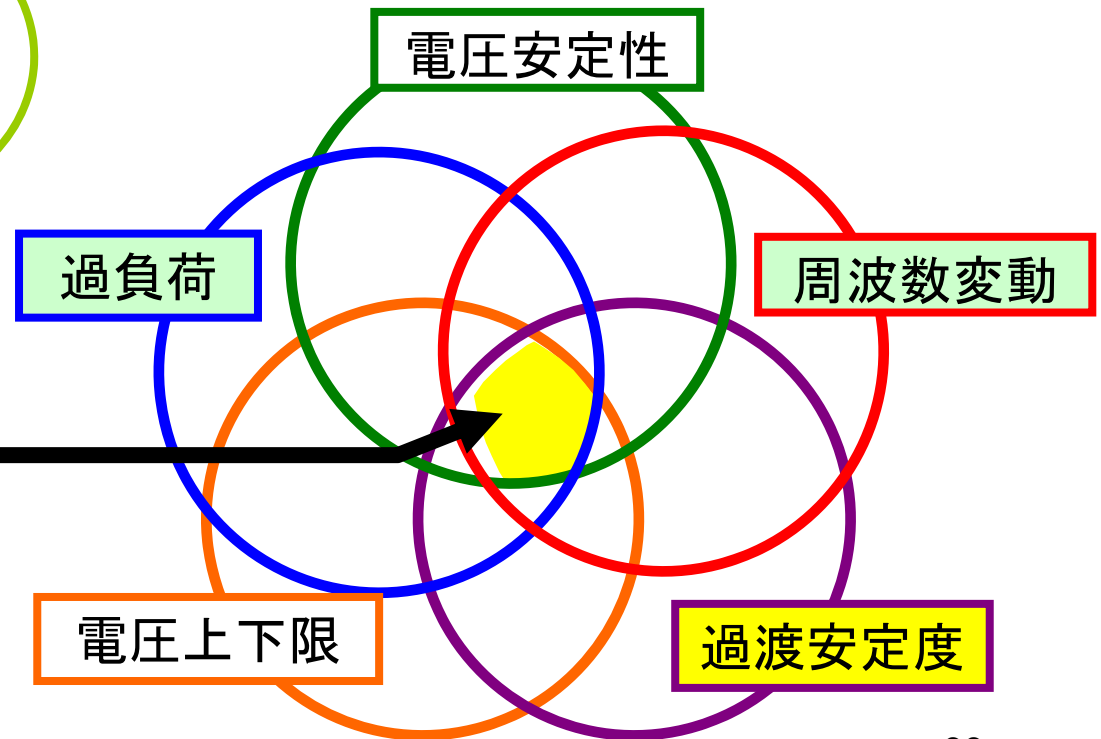
- ・ 線路制約以外の信頼度制約をいかに考慮するか
- ・ 不確定性の増大により、直感的に供給信頼度が低下すると思われる

⇒ これを何とか定量的に評価できないか？

信頼度基準

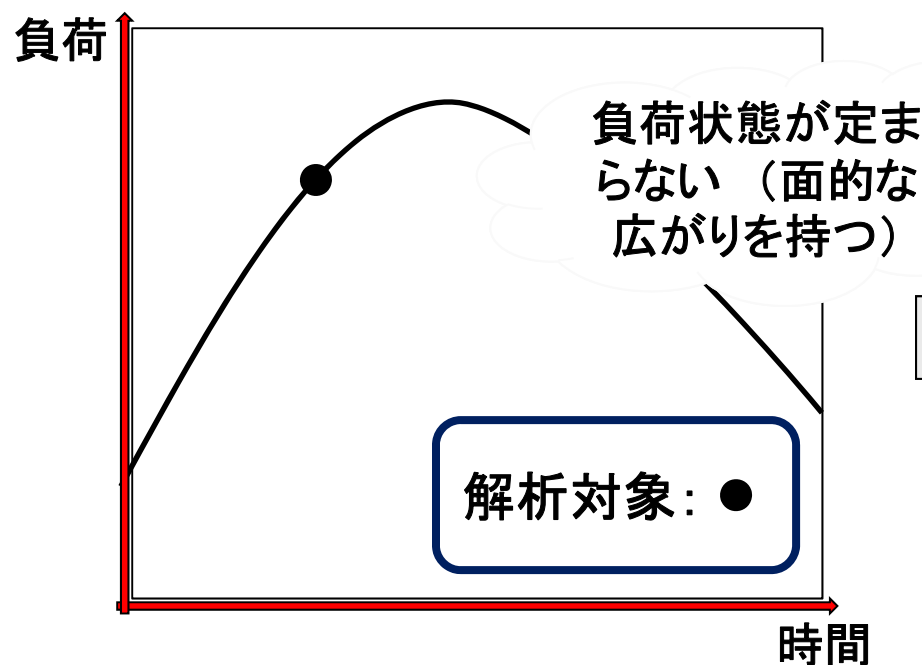


単一の各想定故障に対して、制約条件を逸脱することなく、安定な運用が確保できる領域

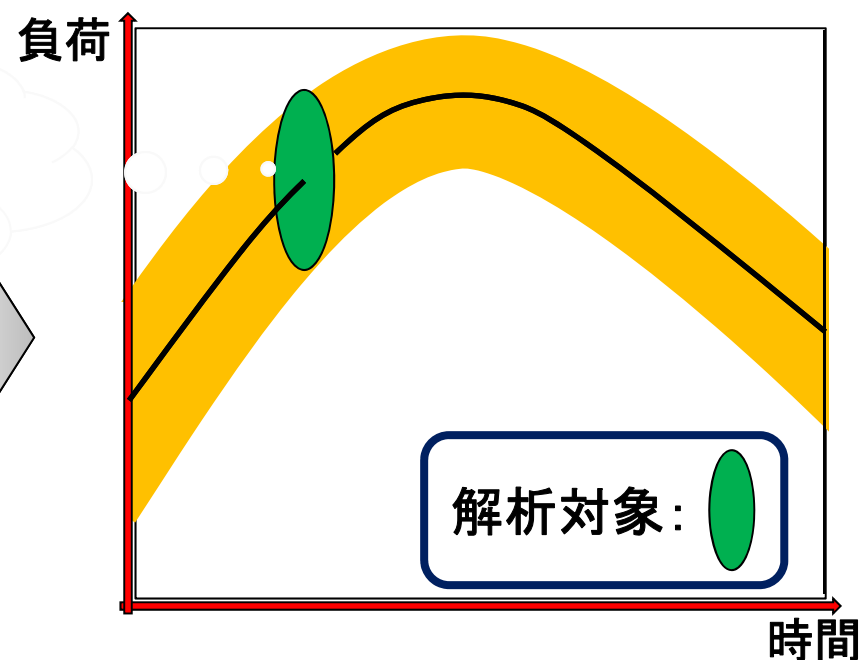


不確定性増大により信頼度解析が困難に

太陽光発電大量導入前 (従来系統)



太陽光発電大量導入後 (将来系統)



手順

1. 負荷状態が定まる
2. 最過酷故障設定
3. 安定性解析
4. 信頼度を保証する運用点を確保

手順

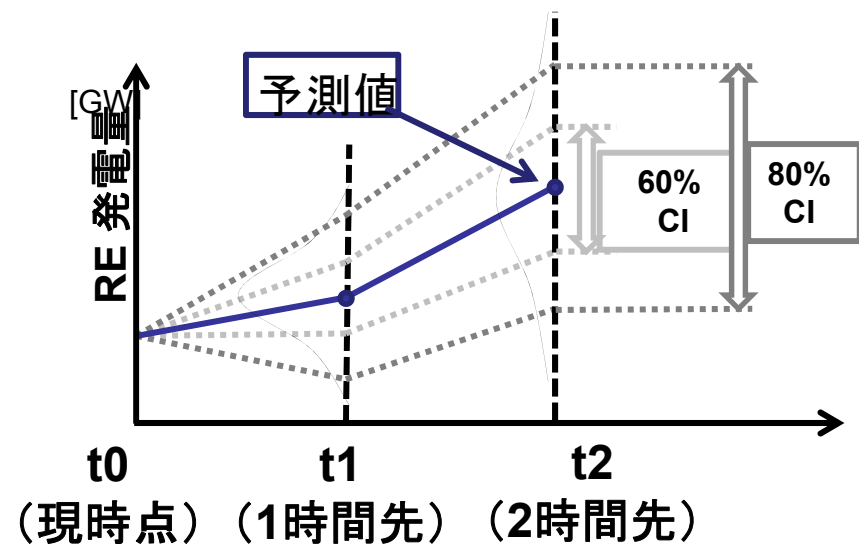
1. 負荷状態を複数準備 (不確定性を考慮)
2. 最過酷故障不明 → 全ケース解析)
3. 安定性解析ケース数が爆発的に増加
4. 安全な運用点を確保できるか？

ロバスト信頼度

ロバスト信頼度の考え方

- ・基本的に確定論(確率論との併用)
- ・不確定性を信頼区間で表現
- ・信頼区間内で確実に安全性を保つ

信頼区間(CI)は予測精度や予測時刻により変化



確率論の問題点(使いにくい理由)

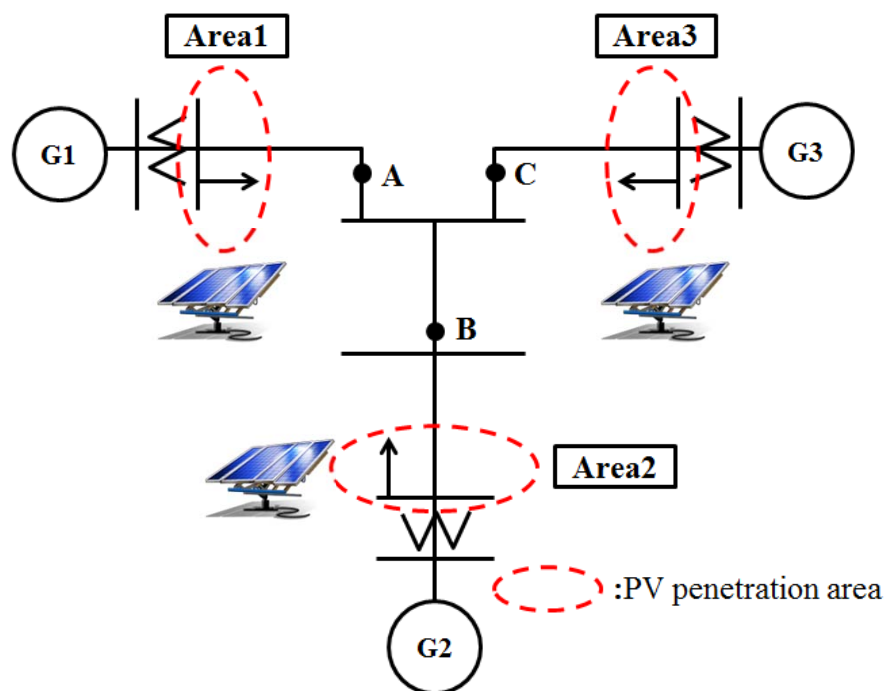
- ・被害期待値 = $\sum_i (\text{事象}i \text{ 確率}) \times (i \text{ 発生時被害額})$

各事象*i*が希頻度で確率はゼロ近傍値。一方被害額が極めて大。よって両者の積が意味をなさない。被害額が大きすぎるので確定論が適切。例:N-1信頼度基準

ロバスト信頼度について

シミュレーションモデル

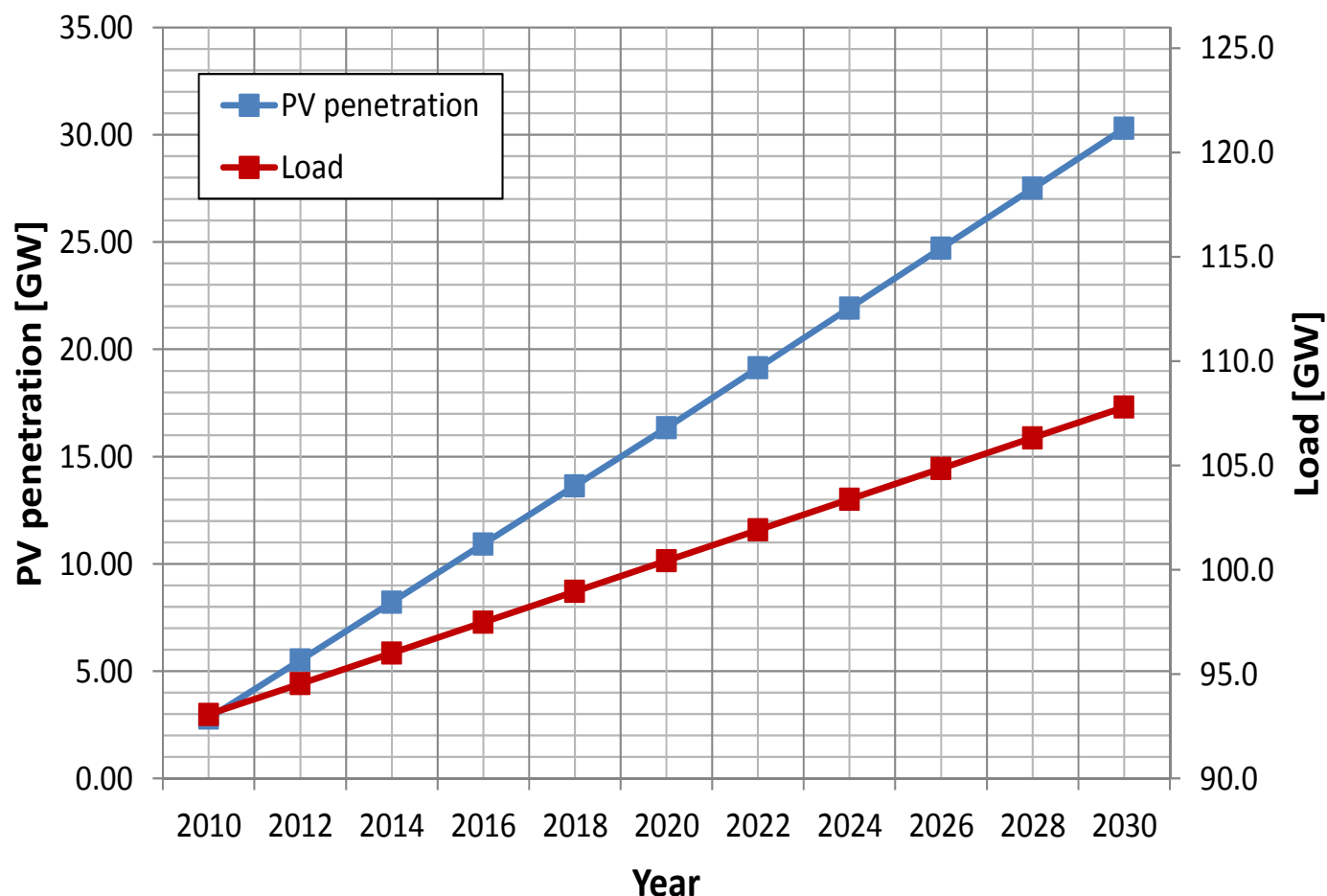
西日本60Hz系統の過渡安定度問題



- PV導入箇所: 地域1,2,3
- 供給予備率: 3%, 8%
- 故障点: A, B, C点(1回線3相地絡故障)
- ※ 過渡安定度のみを取り扱う

ロバスト信頼度について

各年におけるPV導入量, 最大需要の設定



年度毎にロバスト信頼領域の導出 → 20??年度で運用困難に³⁷

ロバスト信頼度について

PVの出力予測範囲

広島気象台で観測された日射量データから10,20分後の最大出力変動率を算出し、設定した。

PVの出力予測範囲

= 現時刻のPV出力 \pm PV導入量 \times 最大出力変動率

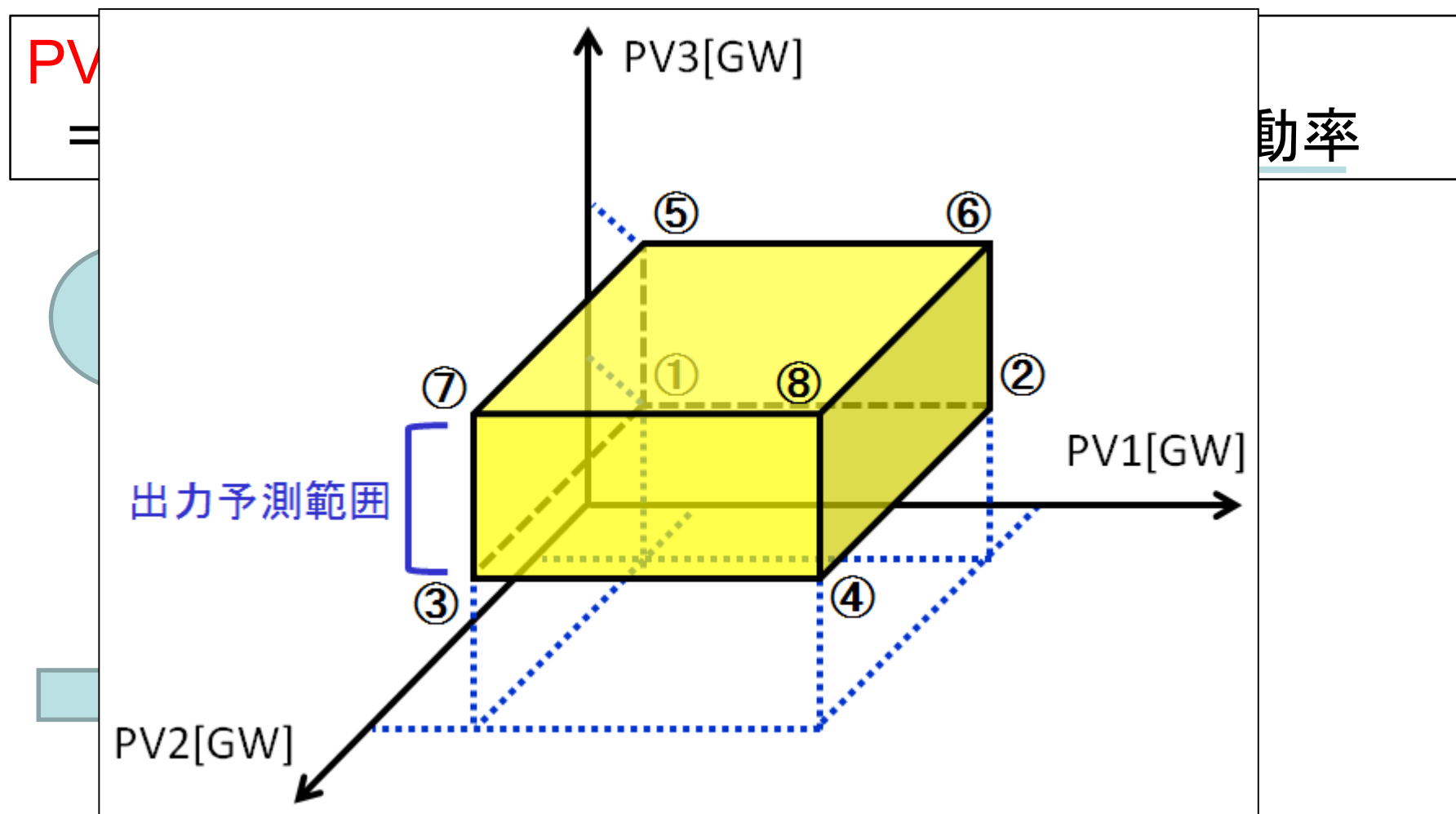
PV導入量の1/2に設定

広島気象台
日射量データより

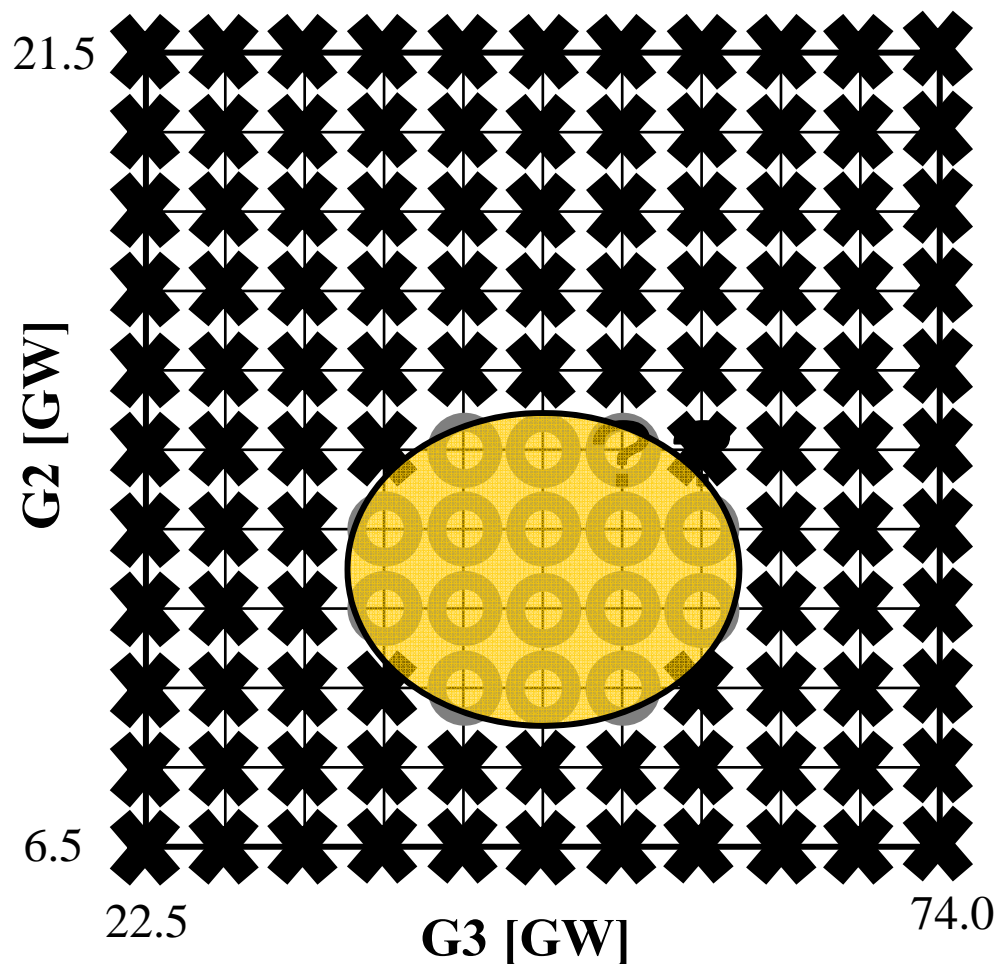
	MFR						
	Time window						
	1min	2min	5min	10min	20min	30min	60min
Measured MFR	33.5	42.6	47.9	50.6	53.7	55.1	58.4
Filtered MFR	4.5	8.6	19.0	31.4	36.9	39.0	44.1
+ Smoothing effect	3.4	6.5	14.2	23.6	27.7	29.3	33.1

ロバスト信頼度について

PVの出力予測範囲～シミュレーションで用いる値～



ロバスト信頼領域の導出(RSS領域)



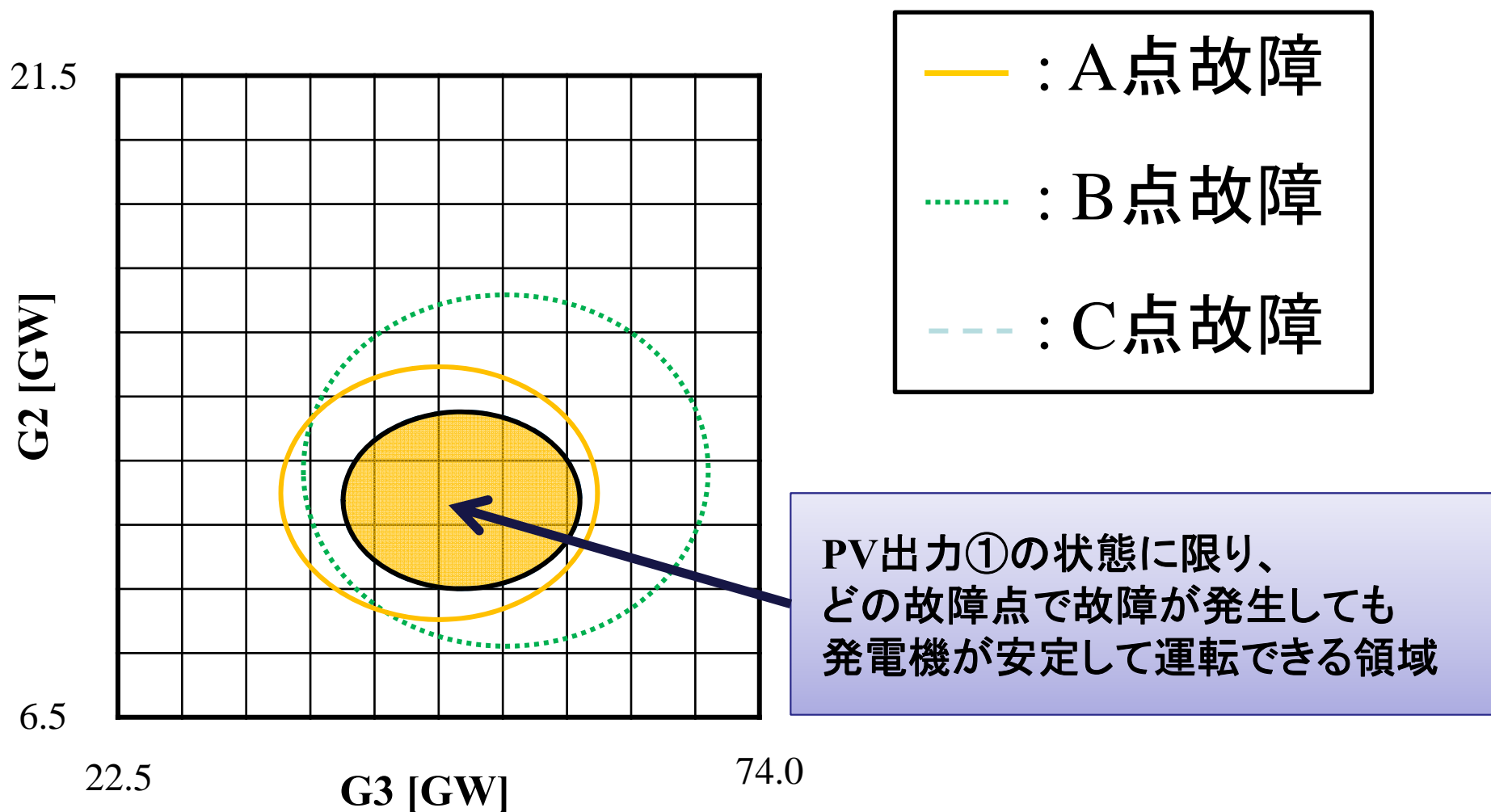
安定 : ○
不安定 : ✕

- 故障点:A
- PV出力①
 PV1 : 出力予測範囲の下限値
 PV2 : 出力予測範囲の下限値
 PV3 : 出力予測範囲の下限値

この場合限り
発電機が安定して運転できる
領域を導出

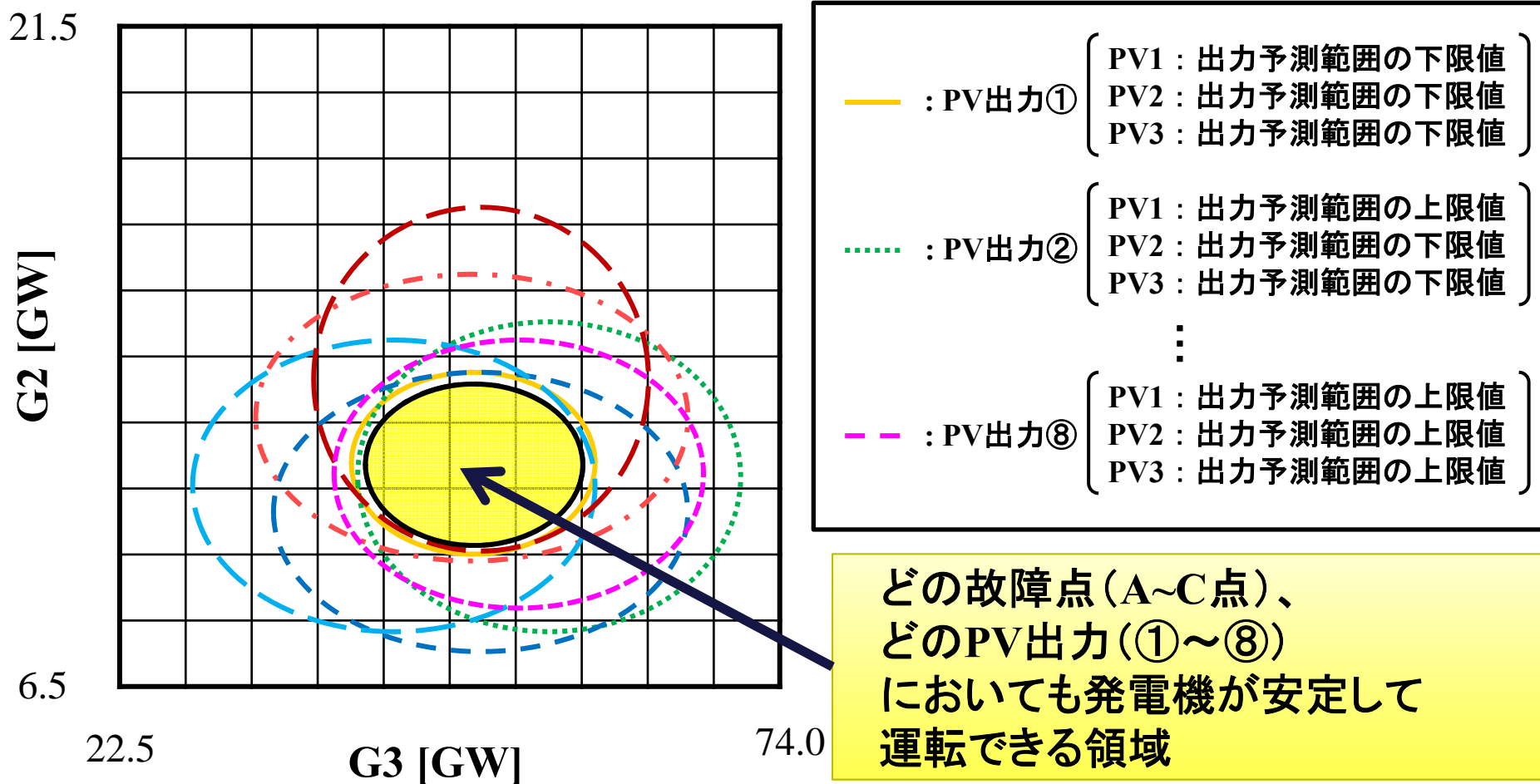
故障点B,Cにおいても同様に導出

ロバスト信頼領域の導出(RSS領域)



残りのPV出力においても同様に導出

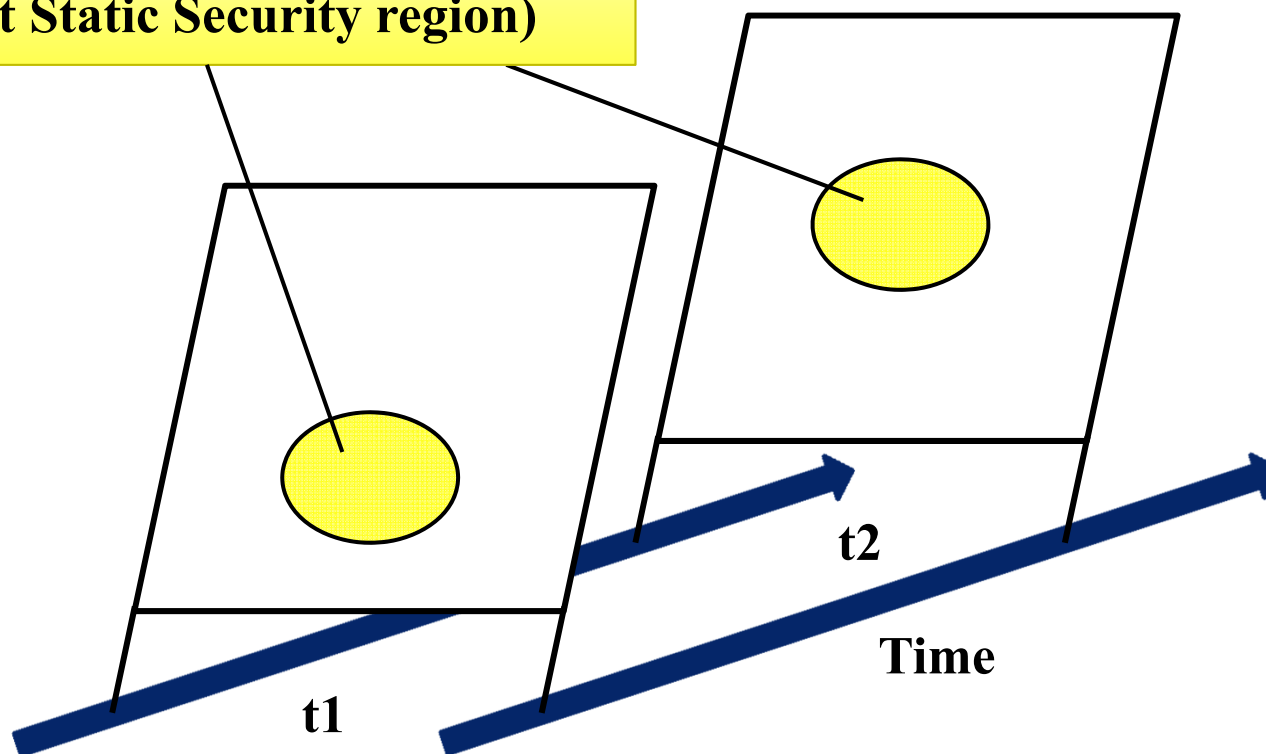
ロバスト信頼領域の導出(RSS領域)



ロバスト静的信頼領域(RSS領域)

ロバスト信頼領域の導出(RSS領域)

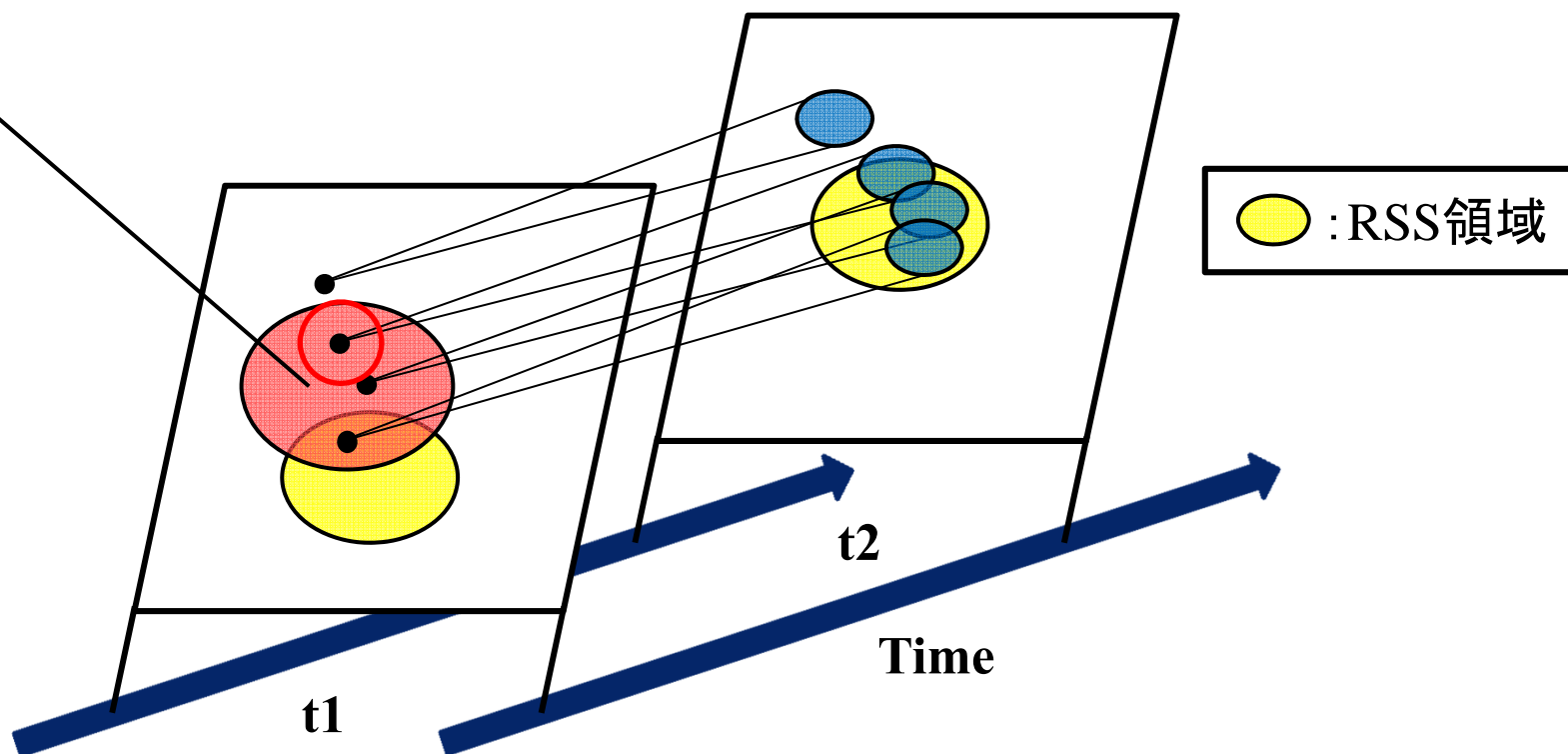
ロバスト静的信頼領域(RSS領域)
(Robust Static Security region)



時刻 t_1, t_2 の時間断面において、不確定性が存在しても信頼度を維持できる発電機の出力量域

ロバスト信頼領域の導出(RTA領域)

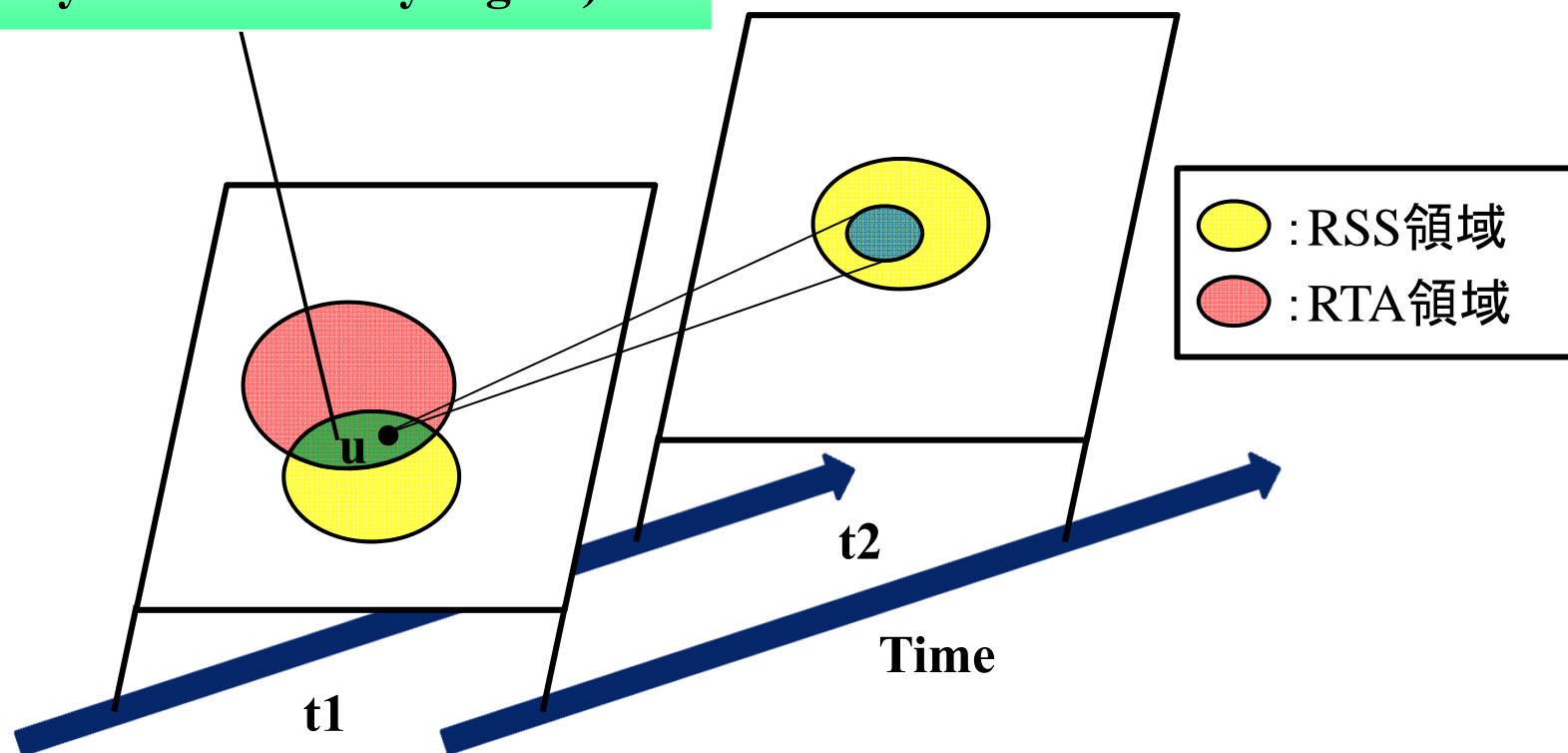
ロバスト到達可能信頼領域 (RTA領域)
 (Robust reachable region for Time-Ahead security)



時刻 t_2 のRSS領域までの経路を保証できる
 時刻 t_1 の発電機の出力量域

ロバスト信頼領域の導出(RDS領域)

ロバスト動的信頼領域 (RDS領域)
(Robust Dynamic Security region)



RDS領域内に運用点を定めることで、
不確定性が存在しても時刻 t_1, t_2 の信頼度を維持することができる

ロバスト信頼領域の導出手続き

上から順に導出

ロバスト静的信頼領域(RSS領域)

特定の時間断面において、不確定性が存在しても信頼度基準を維持できる発電機の出力量域

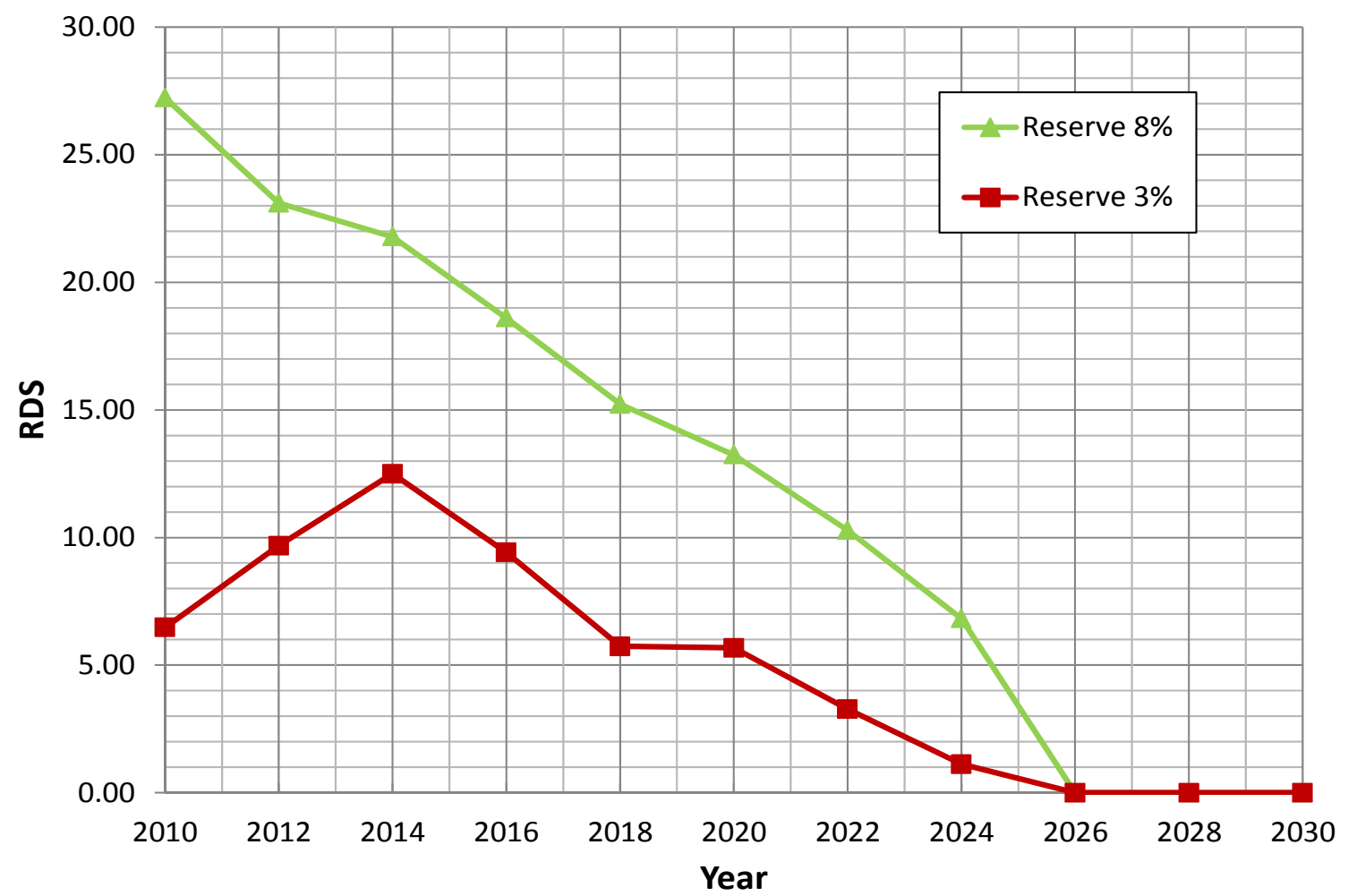
ロバスト到達可能信頼領域(RTA領域)

特定の時間断面において、将来のRSS領域までの経路を保証できる発電機の出力量域

ロバスト動的信頼領域(RDS領域)

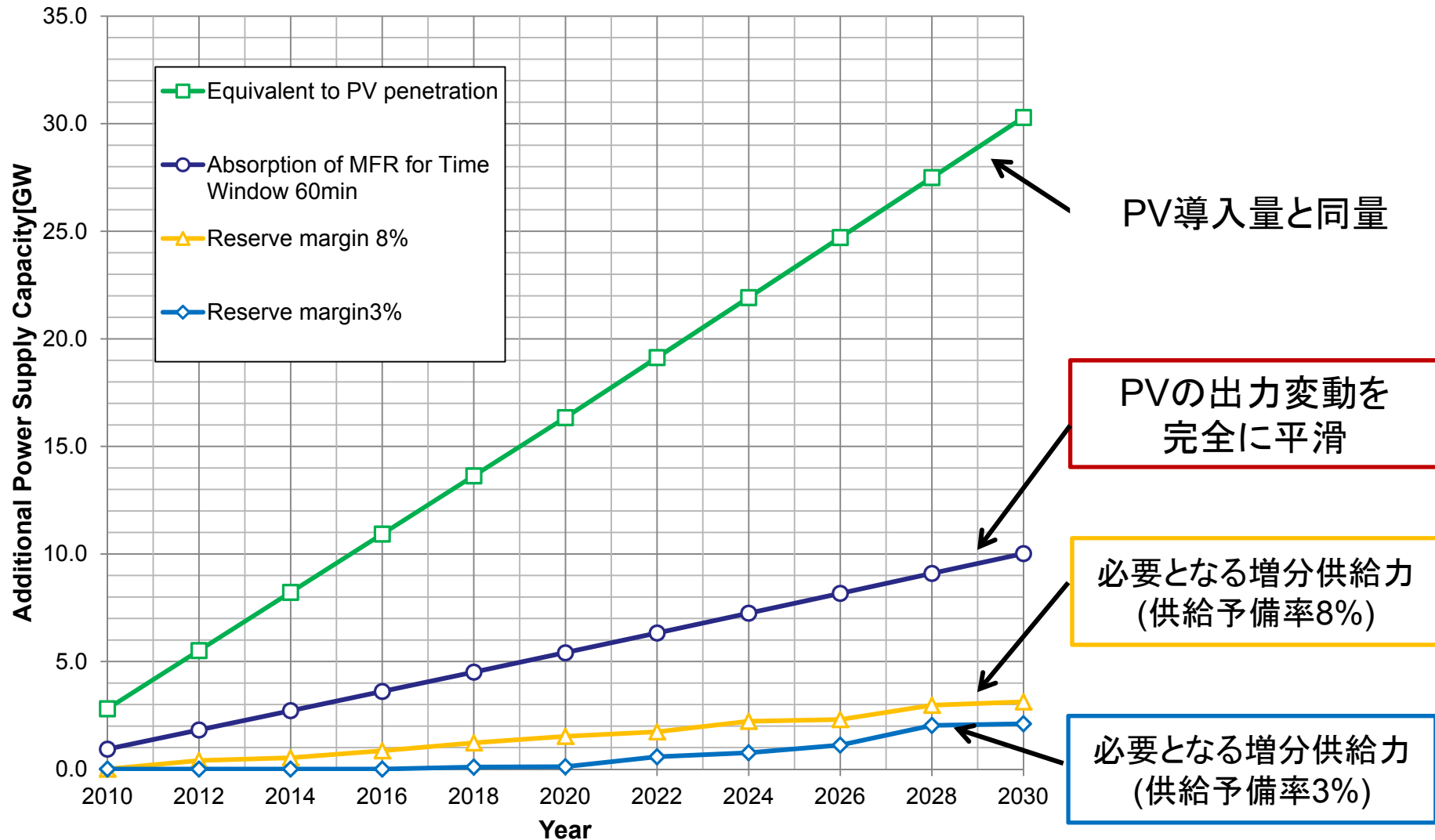
特定の時間断面において、不確定性が存在しても信頼度基準を維持でき、かつ将来のRSS領域までの経路を保証できる発電機の出力量域 (RSS領域とRTA領域の交差領域)

ロバスト信頼領域の年度推移(RDS領域)

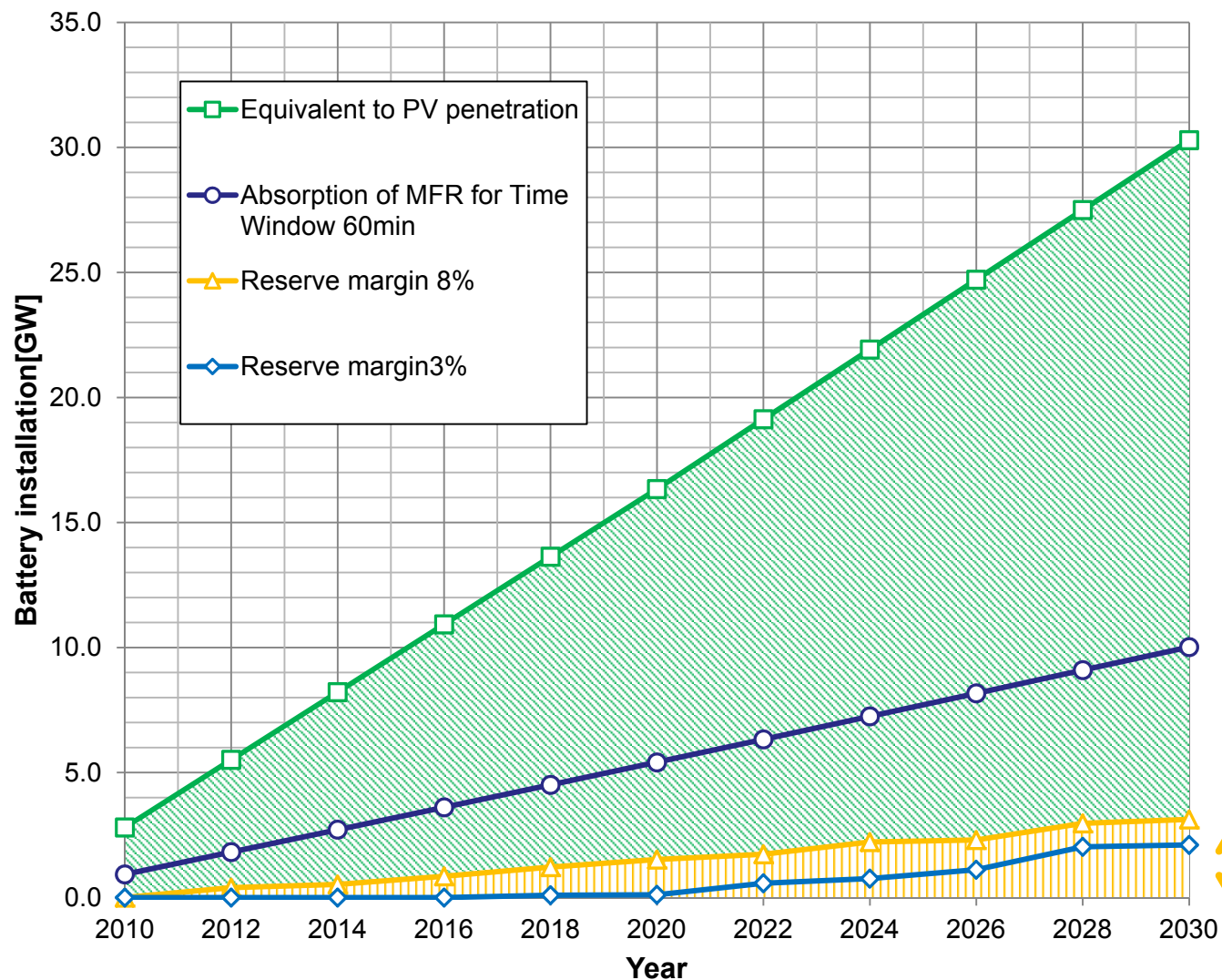


2026年以降RDS領域が消滅 → 対策が必要

将来システムの供給力についての考察



将来システムの供給力についての考察



緑色領域

↓
電力品質面から
必要となる
増分供給力

黄色領域

↓
信頼度面から
必要となる
増分供給力

ロバスト静的信頼領域RSS のモデル

実行可能領域サイズ推定の考え方

静的信頼領域 (SS領域)

不確定性がない場合

超平面

$$c^T u = \alpha$$

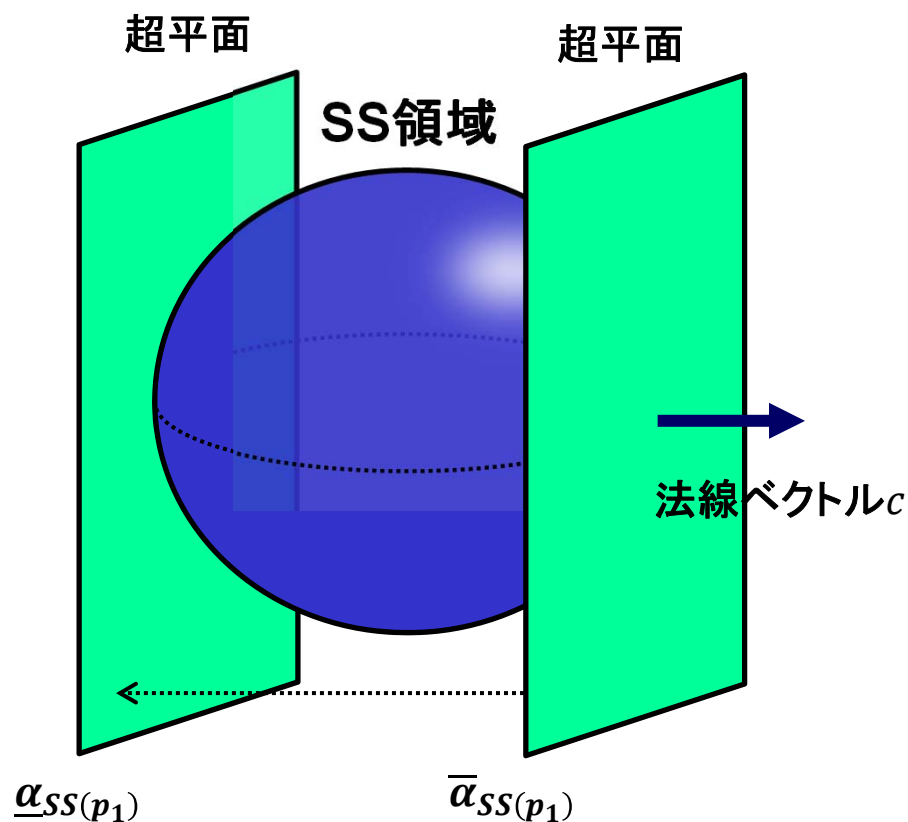
- ※ c : 超平面の法線ベクトル
- ※ u : 制御変数 (発電機出力)



超平面とSS領域が交差する範囲

$$\underline{\alpha}_{SS} \leq \alpha \leq \bar{\alpha}_{SS}$$

法線ベクトル方向におけるSS領域の空間的広がりを把握することができる



静的信頼領域 (SS領域) 不確定性がない場合

SS領域の空間的広がり

超平面とSS領域が交差する範囲

$$\underline{\alpha}_{SS} \leq \alpha \leq \bar{\alpha}_{SS}$$



線形計画法

- u : 制御変数 (発電機出力)、 p : 変動パラメータ (PV出力 - 負荷)

目的関数

SS領域の上限値算出の場合 : $\bar{\alpha}_{SS} = \max_u \alpha = \max_u c^T u$

SS領域の下限値算出の場合 : $\underline{\alpha}_{SS} = \min_u \alpha = \min_u c^T u$

ELD問題の 制約条件

✓ 需給バランス制約

$$e^T (u + p) = 0, e = [1 \ \dots \ 1]^T$$

✓ 線路潮流制約

$$P_{TL} \leq S^{(n)} \cdot (u + p) \leq \bar{P}_{TL}, n = 0, 1, \dots, N$$

P_{TL} : 線路潮流、 S : 変換行列、 n : 故障状態

✓ 発電機出力上下限制約

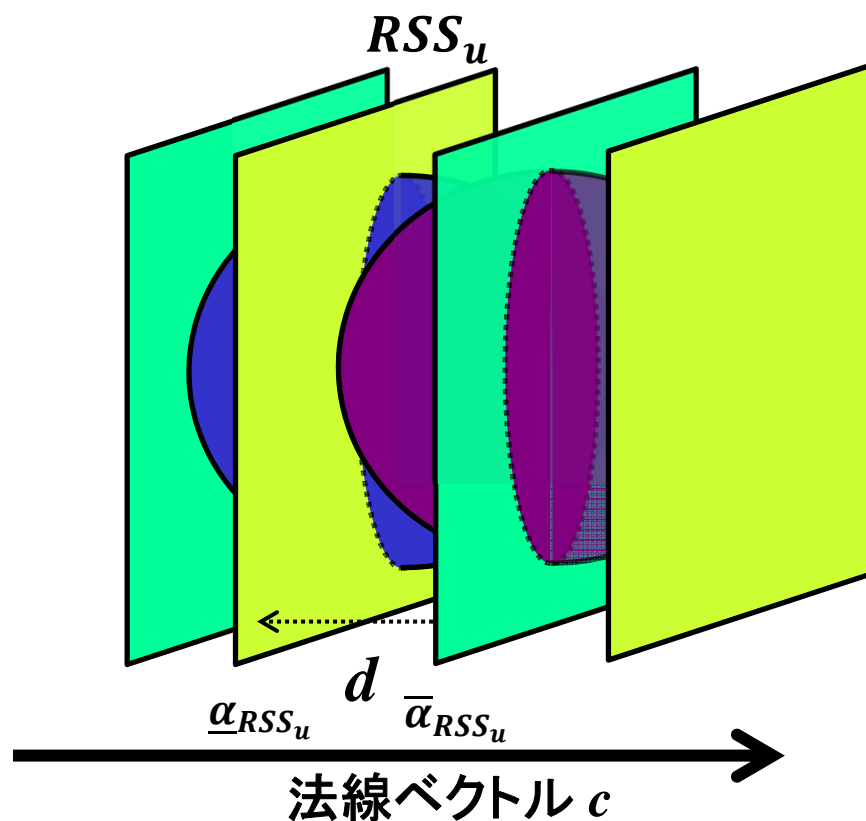
$$\underline{u} \leq u \leq \bar{u}$$

✓ 変動パラメータ p は固定値 (既知)

RSS領域のサイズ推定

不確定性がある場合

ロバスト静的信頼領域 (RSS領域)



変動パラメータの値により領域が変化

超平面とRSS領域が交差する範囲

$$\underline{\alpha}_{RSS} \leq \alpha \leq \bar{\alpha}_{RSS}$$

$$\bar{\alpha}_{RSS} = \min_p \bar{\alpha}_{SS} = \min_p (\max_u c^T u)$$

$$\underline{\alpha}_{RSS} = \max_p \underline{\alpha}_{SS} = \max_p (\min_u c^T u)$$

RSS領域の評価指標

$$d = \frac{1}{\|c\|} (\bar{\alpha}_{RSS} - \underline{\alpha}_{RSS})$$

「超平面間の距離」

法線ベクトル 方向における
RSS領域の径を表している

RSS領域の算出方法

RSS領域の空間的広がり

不確定性がある場合

超平面とRSS領域が交差する範囲

$$\underline{\alpha}_{RSS} \leq \alpha \leq \bar{\alpha}_{RSS}$$



問題が複雑化

目的関数

RSS領域の上限値算出の場合 : $\bar{\alpha}_{RSS} = \min_{u,p} \{ \max_u c^T u \}$

RSS領域の下限値算出の場合 : $\underline{\alpha}_{RSS} = \max_{u,p} \{ \min_u c^T u \}$

ELD問題の 制約条件

✓ 需給バランス制約

$$e^T(u + p) = 0, e = [1 \ \dots \ 1]^T$$

✓ 線路潮流制約

$$P_{TL} \leq S^{(n)} \cdot (u + p) \leq \bar{P}_{TL}, n = 0, 1, \dots, N$$

P_{TL} : 線路潮流、 S : 変換行列、 n : 故障状態

✓ 発電機出力上下限制約

$$\underline{u} \leq u \leq \bar{u}$$

✓ 変動パラメータ上下限制約

$$\underline{p} \leq p \leq \bar{p}$$

u : 制御変数(発電機出力), p : 変動パラメータ(PV出力-負荷)

ロバスト最適化問題に帰着

$\bar{\alpha}_{RSS}$ 定式化の変形

原問題U-1

$$\bar{\alpha}_{RSS} = \min_{u,p} \{c^T u\}$$

s.t.

$$\begin{aligned} e^T(u+p) &= 0 \\ \underline{P}_{TL} \leq S^{(n)} \cdot (u+p) \leq \bar{P}_{TL} \\ \underline{u} \leq u \leq \bar{u} \\ \underline{p} \leq p \leq \bar{p} \end{aligned}$$

$$u \in \arg \max_u \{c^T u\}$$

s.t.

$$\begin{aligned} e^T(u+p) &= 0 \\ \underline{P}_{TL} \leq S^{(n)} \cdot (u+p) \leq \bar{P}_{TL} \\ \underline{u} \leq u \leq \bar{u} \\ \underline{p} \leq p \leq \bar{p} \end{aligned}$$

原問題U-2

$$\bar{\alpha}_{RSS} = \min_{u,p} \{c^T u\}$$

s.t.

$$Ap + Bu \leq b$$

$$u \in \arg \max_u \{c^T u\}$$

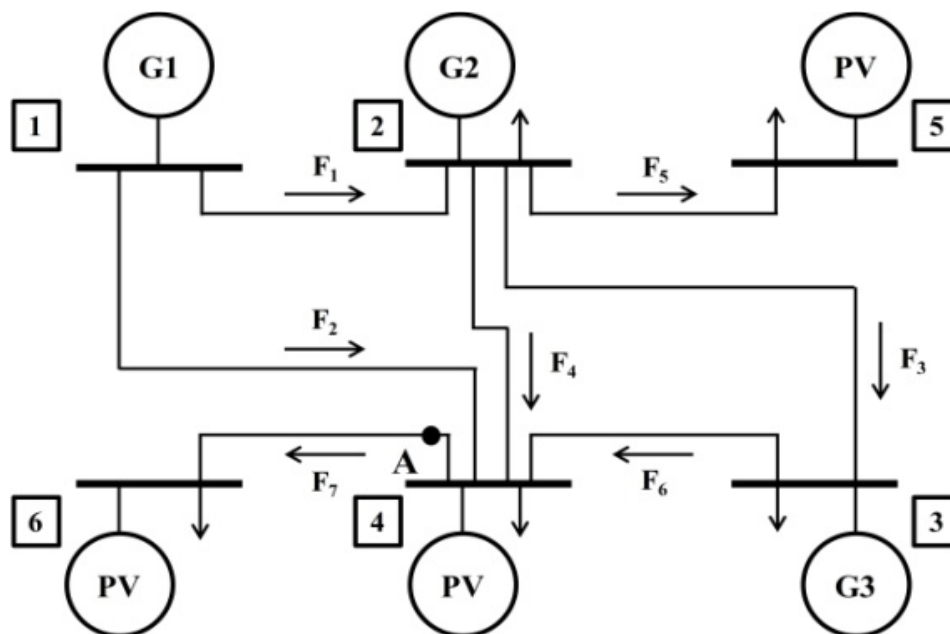
s.t.

$$Ap + Bu \leq b$$

制約条件を整理する

RSS領域の算出

シミュレーションモデル



- ・PV設置箇所: 3箇所
- ・故障点: A点
- ・制約条件

- ✓ 需給バランス制約
- ✓ 線路潮流制約
- ✓ 発電機出力上下限制約
- ✓ PV出力上下限制約

ケース設定

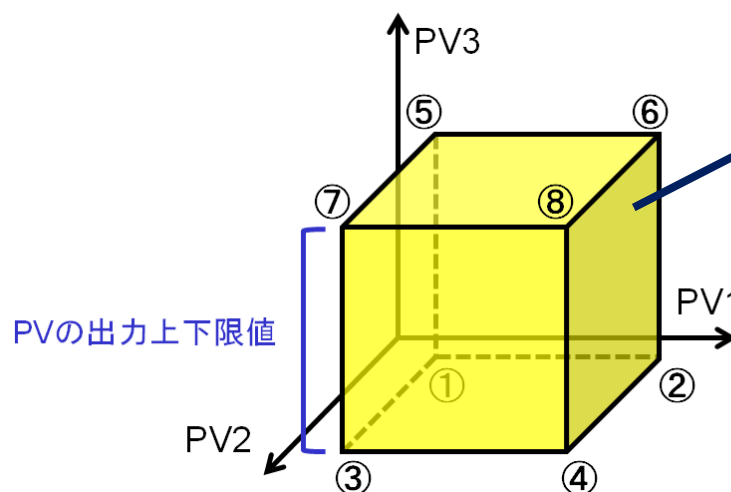
PVの出力上下限制約

	PV1		PV2		PV3	
	下限値	上限値	下限値	上限値	下限値	上限値
Case1	250	250	250	250	250	250
Case2	200	300	200	300	200	300
Case3	50	450	50	450	50	450



不確定性
増大

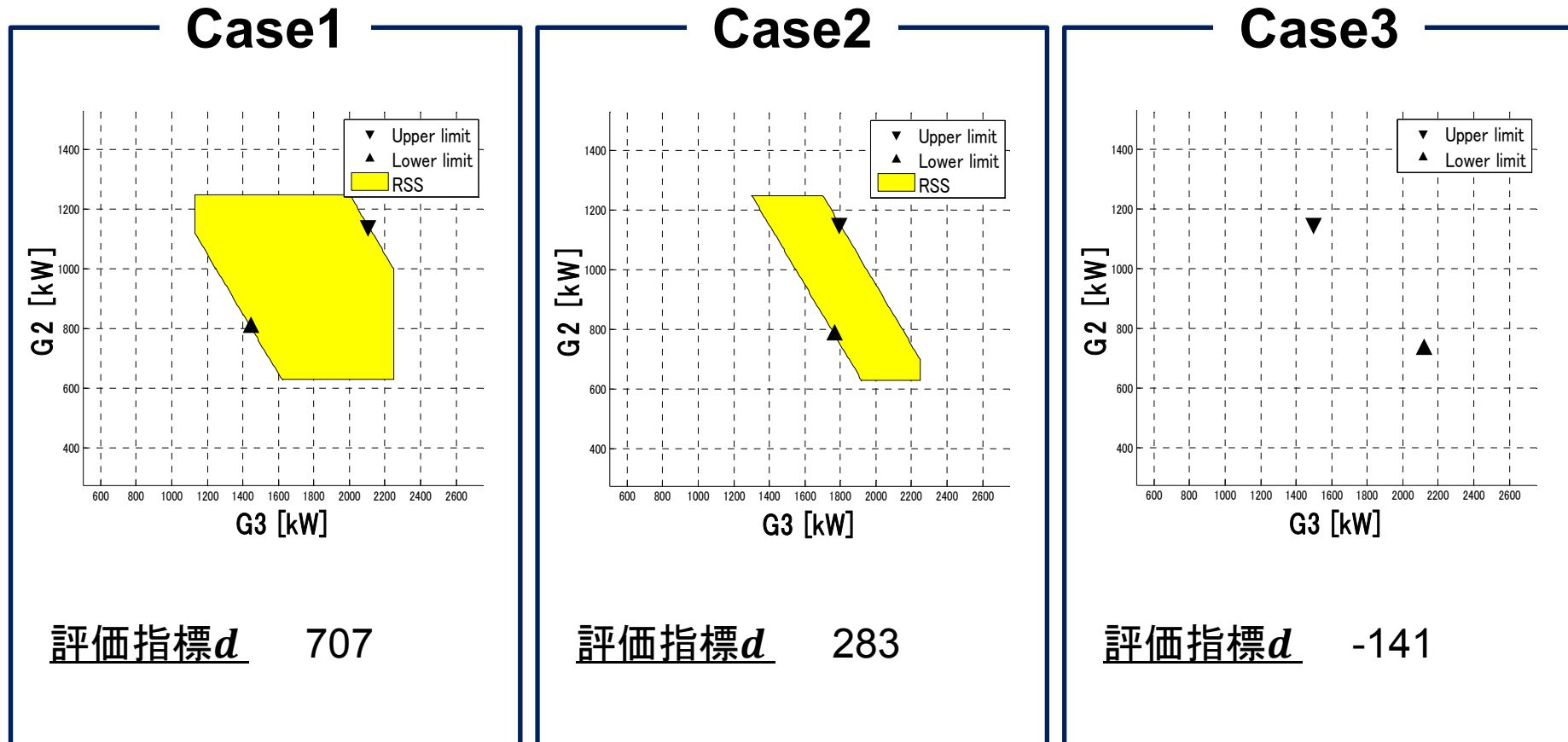
※単位は kW



不確定性

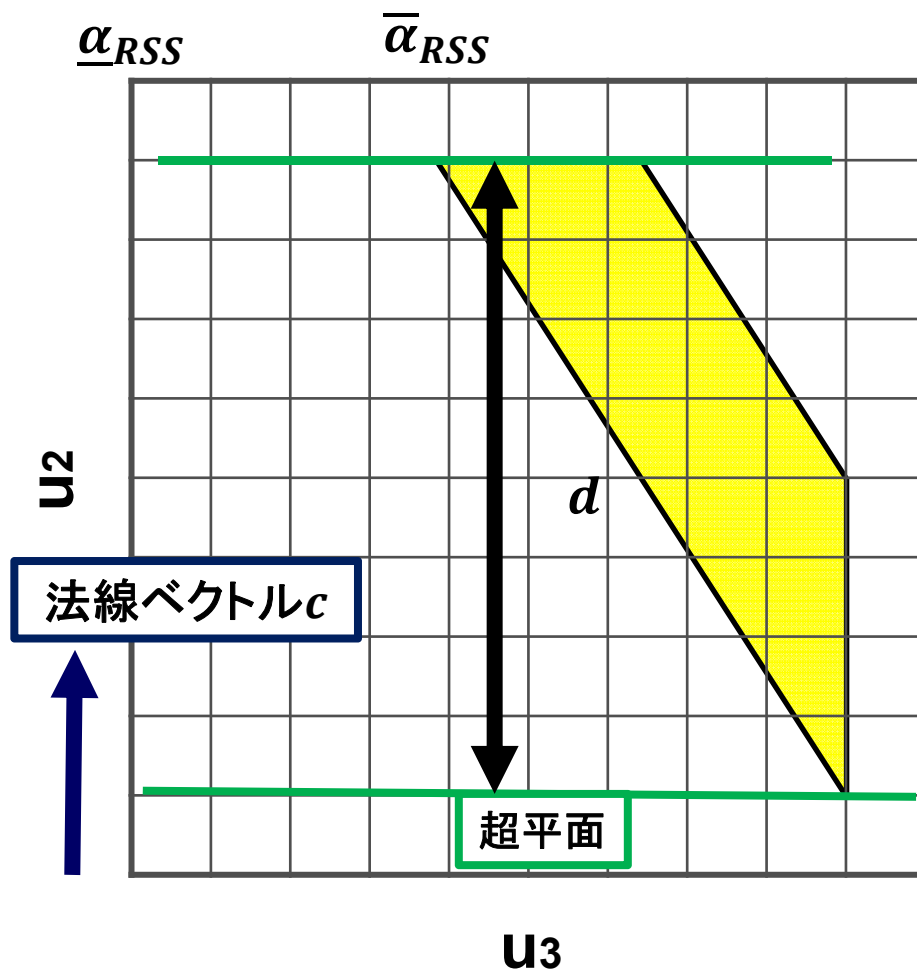
従来手法でRSS領域の導出する際には
PV出力①～⑧の8点を使用

RSS領域の計算結果



厳密解を正確に算出できた
 評価指標 d は不確定性の増大に伴い減少

法線ベクトルcの扱い方について



$$c^T = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$c^T u = u_2$$

まとめと今後の課題

需給制御法の特長

- ・リアルタイム繰り返し計算による不確定性への対応
- ・実行可能領域に基づくロバストな周波数維持
- ・線路制約の確率論的取り扱い
- ・想定故障への対応

線形ネットワークモデルの利用

⇒ 線形化誤差はあるがメリット大

ロバスト信頼度モデル

- ・新しい確定論的信頼度モデルとして提案

今後の課題： 過渡安定度評価モデルに適用