

GFMインバータ関連の動向

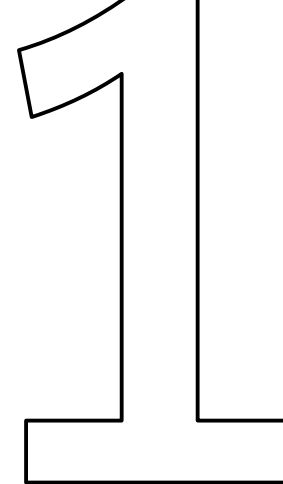
橋本 潤

産総研 再生可能エネルギー研究センター
エネルギーネットワーク研究チーム
研究チーム長

2026年3月23日

第2回次世代太陽光発電システム分科会

本日の内容・アジェンダ

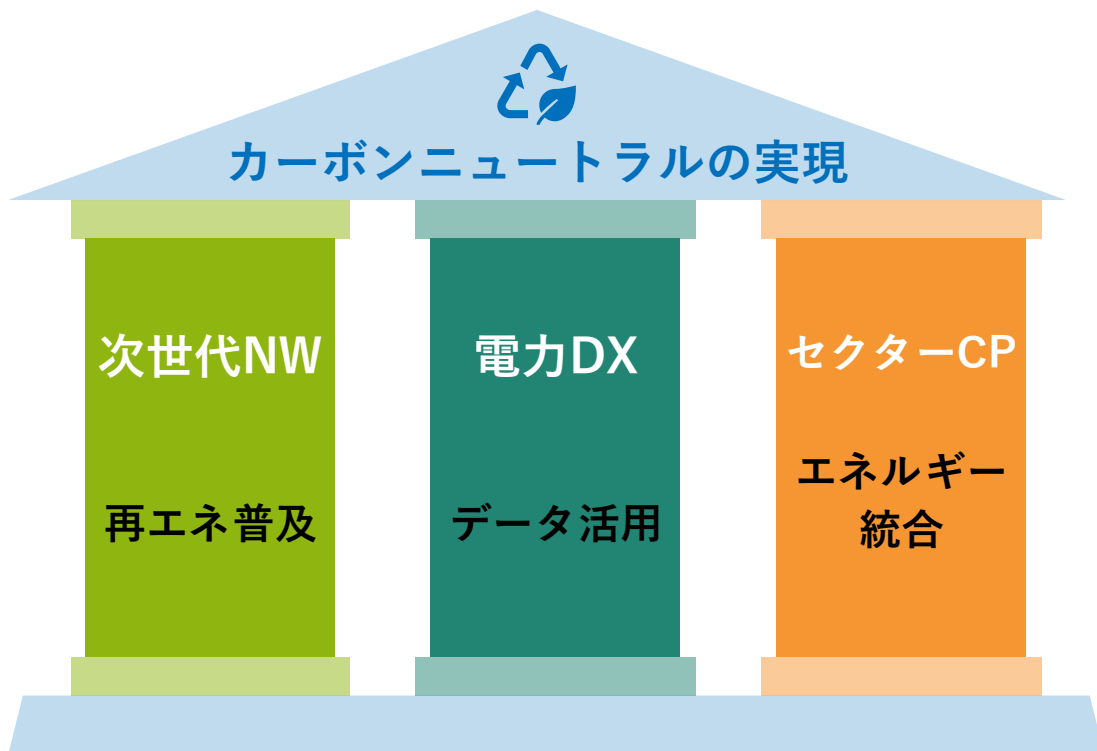


1. 本日の内容・研究チームの紹介
2. GFMインバータとは
3. GFMインバータの必要性
4. 日本の政策・制度的背景
5. 海外動向（グリッドコード・要求仕様）
6. 産総研のGFMインバータに係る取り組み
7. まとめ・展望

ミッション

「次世代電力ネットワークの研究開発により、カーボンニュートラル社会の実現に貢献します。」

チームの目標



3つの技術開発の柱



次世代NW (ネットワーク)
再エネ普及と電力系統の高度化



電力DX (デジタルトランスフォーメーション)
電力データ活用と市場促進



セクターCP (セクターカップリング)
電力・熱・水素等の統合活用

チーム構成 (35名)

研究者	4名	客員研究員	13名	ポスドク	2名	招聘研究員	1名
テクニカルスタッフ	5名	派遣職員	5名	リサーチアシスタント	1名	技術研修員	4名



研究チーム長
橋本 潤
専門
スマートグリッド



主任研究員
児玉 安広
専門
系統故障解析



主任研究員
ウスツン タハセリム
専門
サイバーセキュリティ



主任研究員
織原 大
専門
系統解析



ポスドク
カリク ラハマン
専門
パワエレ



ポスドク
スンジョ クリスチャンベルベ
専門
パワエレ

特徴・強み



スマートグリッド、電力系統解析、系統故障解析、パワーエレクトロニクス、AI活用技術等の幅広い専門家



世界有数の研究・試験設備を活用した技術開発

研究チーム概要：客員研究員（13名）



田岡 久雄

元大和大学
特任教授

専門 系統解析



末包 和夫

三社電機製作所
シニアフェロー

専門 パワエレ



横山 明彦

東京大学
名誉教授

専門 電力全般



喜久里 浩之

早稲田大学
准教授

専門 配電系統
AI・HIL



五十嵐 広宣

Power X CSO
宮崎大学客員教授

専門 パワエレ・
評価・国際標準



石井 英雄

早稲田大学
教授 / 事務局長

専門 電力全般
ERAB



真鍋 勇介

真鍋ラボ
代表取締役

専門 電力系統工学
数値最適化



大谷 謙仁

福島国際研究教育
機構(F-REI) 課長

専門 太陽光発電等



太田 豊

eVooster代表取締役
大阪大学特任教授

専門 EV・V2G

吉岡 康哉

富士電機 主査

専門 パワエレ・EMC

志田 浩義

EMCテック 代表取締役

専門 EMC

長畑 樹

日本カーネルシステム

専門 システム・機器開発・設計

小林 延久

早稲田大学 主任研究員

専門 通信・国際標準化

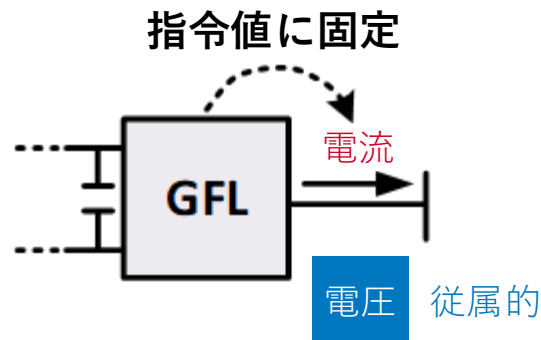
GFMインバータとは

従来型インバータ（GFL）とGFMインバータの違い

インバータの役割（制御量）に基づく分類

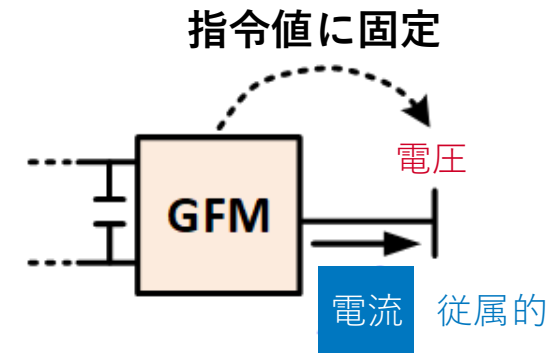
🔌 Grid Following (GFL)

- 出力電流（電力）を制御対象とするもの → 電流源的
- 電圧は系統に依存（追従）
- スマートインバータはGFLに属する
- 系統電圧が安定であることを前提とする制御
→ 再エネ主体系統では動作が不安定化する恐れあり



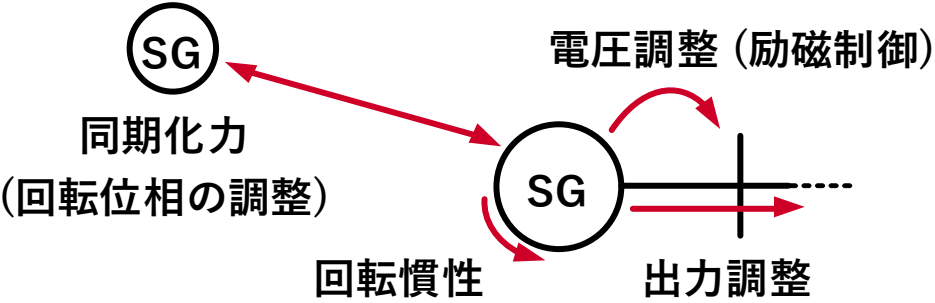
⚡ Grid Forming (GFM)

- 出力電圧を制御対象とするもの → 電圧源的
- 電圧維持能力を有するため、再エネ主体系統でも比較的安定して動作可能



インバータの変換方式（電圧型・電流型）による分類の事ではない点に注意

	位相角安定性	周波数安定性	電圧安定性
要件	同期運転の維持	周波数の品質維持	電圧の品質維持
安定性維持に必要な能力	同期化力	- 慣性 (短時間) - 需給調整	- 電源の電圧維持能力 - 無効電力調整能力
能力を提供している機器	- 同期発電機 - 同期調相機	- 同期発電機 - 再エネ/DR負荷 - 蓄電池	- 同期発電機 - 力率調整再エネ - 各種調相設備/変電設備



同期発電機は安定性維持において重要な役割を果たしてきた



課題

他の機器により安定性を維持する方法を確立しなくてはならない

同期発電機との比較——GFMが提供できる系統サービス

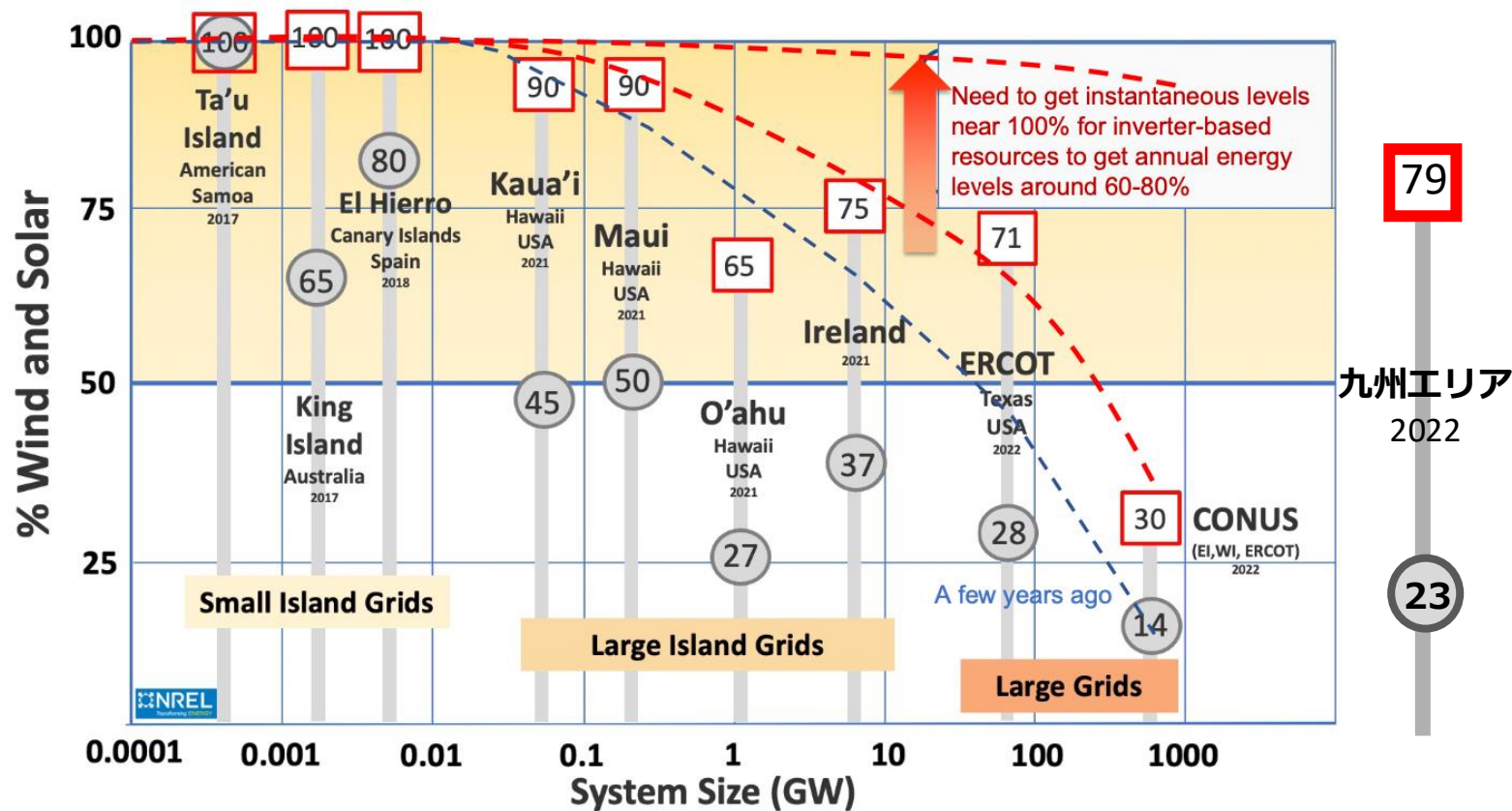
- 同期発電機が持つ機能とGFMの対応関係

機能	同期発電機	GFL	GFM
慣性応答	◎ 物理的慣性	△ FFRによる近似的応答	◎ 仮想慣性
周波数形成	◎	×	◎
電圧形成	◎	△	◎
同期化力	◎	×	◎
ブラックスタート	◎	×	○
短絡電流	◎	△	△ 電流制限あり

GFMインバータの必要性

瞬時出力(kW)と発電量(kWh)の再エネ比率

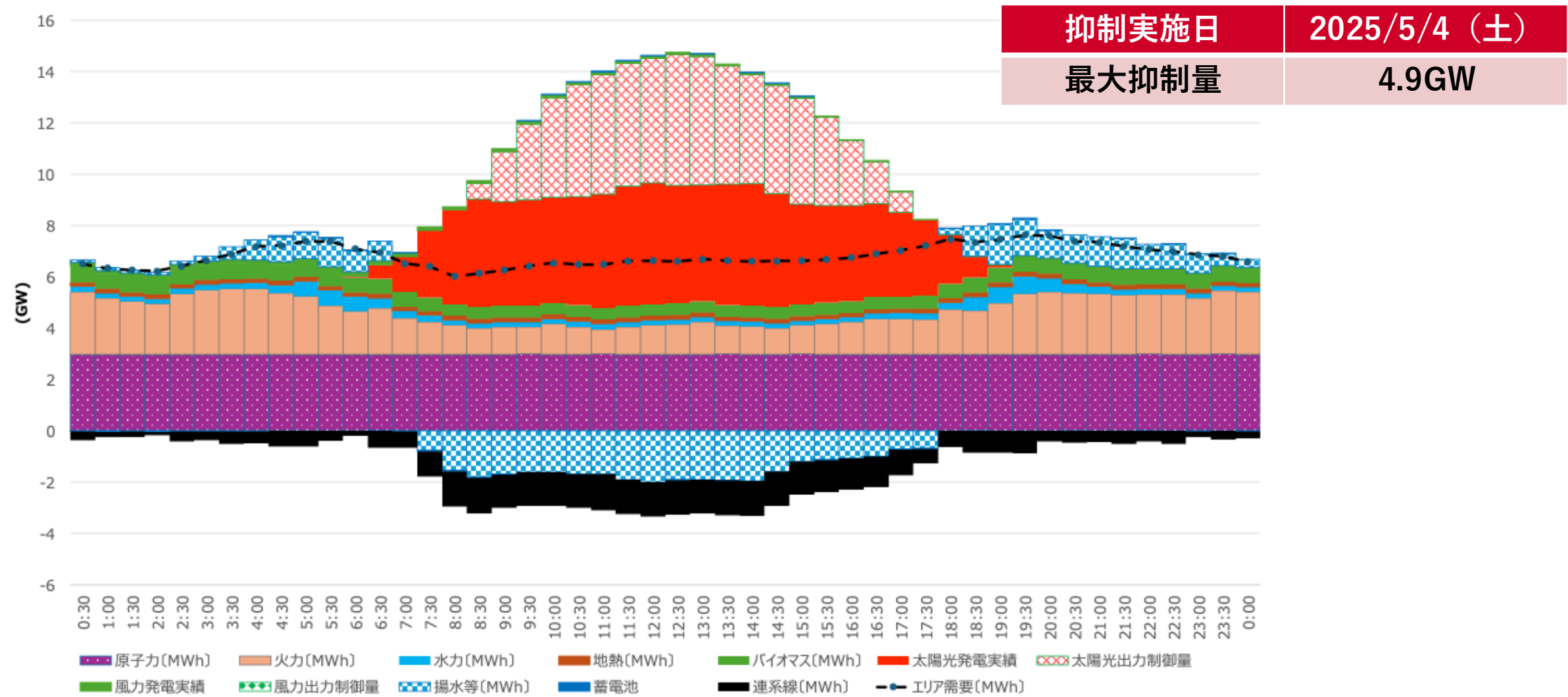
- 瞬時出力(kW)と発電量(kWh)の再エネ比率の違い
- 九州エリア2022年：瞬時再エネ比率79%の実績
- SNSPが高い場合の系統不安定化リスク



出典：Ben Kroposki, "Recent Accomplishments of the UNIFI Consortium"

再エネ抑制量最大日のエリア需給

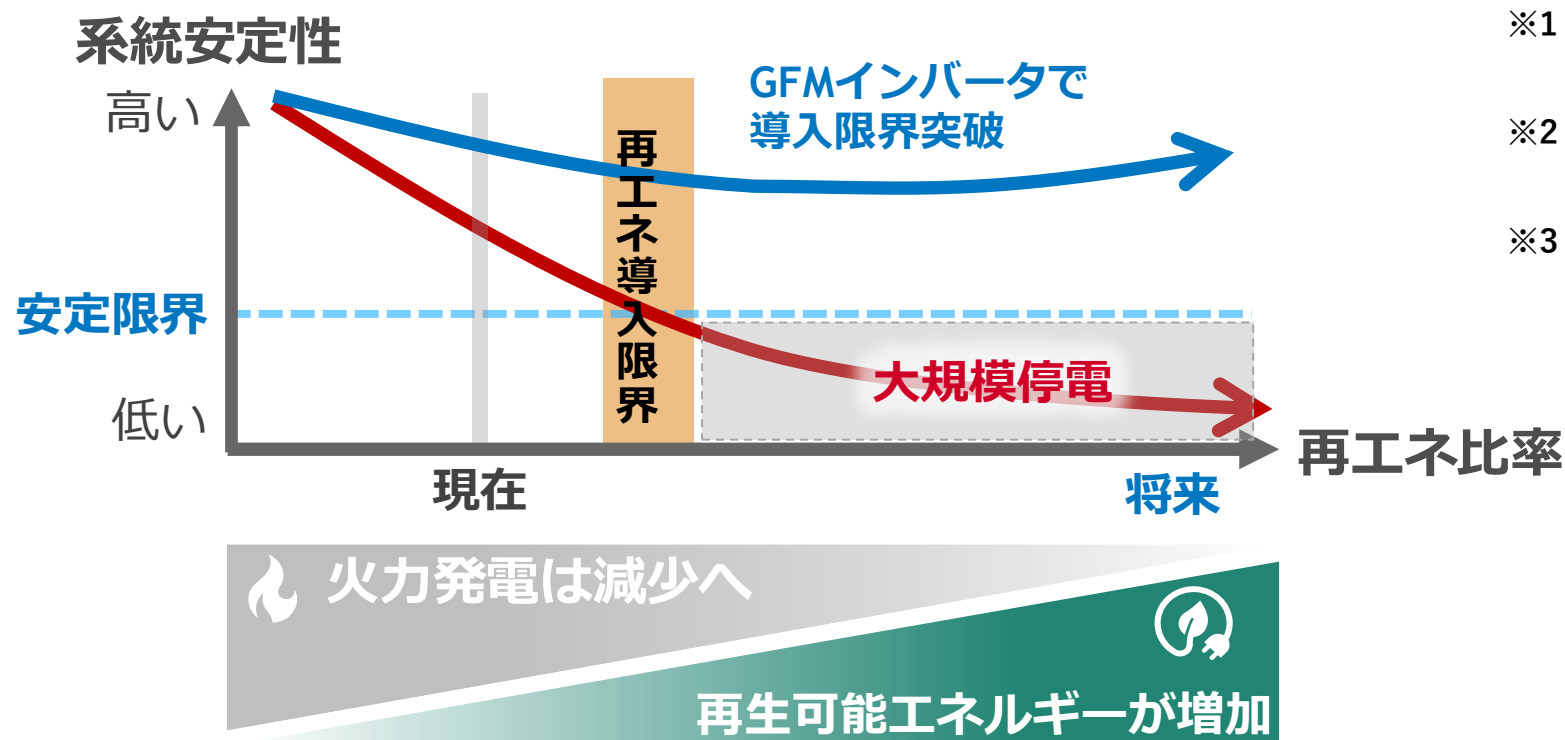
- 再エネ抑制量は年々増加。再エネによる系統サポートや調整力機能が必要。



再エネ主力電源化には次世代インバータが必要

再エネの普及拡大により、電力系統の柔軟性や安定性の確保が喫緊の課題。

- ・ 従来の再エネは系統の電圧・周波数に“追従”する「Grid Following型※1」インバータ電源（IBRs ※2）
- ・ 再エネの導入が進み、火力などの同期発電機が減少すると系統の安定性維持が困難になる
- ・ IBRsも火力等と同様に電圧源として電圧・周波数を“形成”する「Grid Forming（GFM）型※3」へ



※1 Grid Following型（GFL）インバータ：

系統追従型電源は電流源のように振る舞う

※2 IBRs(Inverter-Based Resources)：

太陽光・風力・蓄電池等のインバータ連系型の分散電源

※3 Grid Forming型（GFM）インバータ：

系統形成型電源は電圧源のように振る舞う

カーボンニュートラル実現に向けた3つの技術的解決策

1. 同期発電機の容量確保とカーボンフリー燃料の導入



- 再エネ大量導入に備えた同期発電機容量の維持・確保が必要
- 水素・アンモニアの混焼／専焼技術の確立と燃料供給体制の構築が鍵
- 課題：技術の成熟と導入コストの低減

2. 同期調相機の再評価と制度設計の見直し



- 無効電力供給・慣性付加・短絡容量の確保に貢献
- 成熟技術であり導入実績も豊富
- 課題：発電しないため費用回収（制度的支援が必要）の確立が必要

3. GFMインバータの導入（PV・風力・蓄電池）



- 同期発電機の代替により系統安定化に貢献
- 既存インバータのソフトウェア改良で対応可能な場合もあり導入柔軟性が高い
- 課題：短絡容量不足・インバータ起因不安定性、実証・評価・標準化の推進

▶ 欧州ではGFM機能の導入を義務化する動き



水素専焼／混焼エンジン技術
（水素キャリア利用研究チーム）

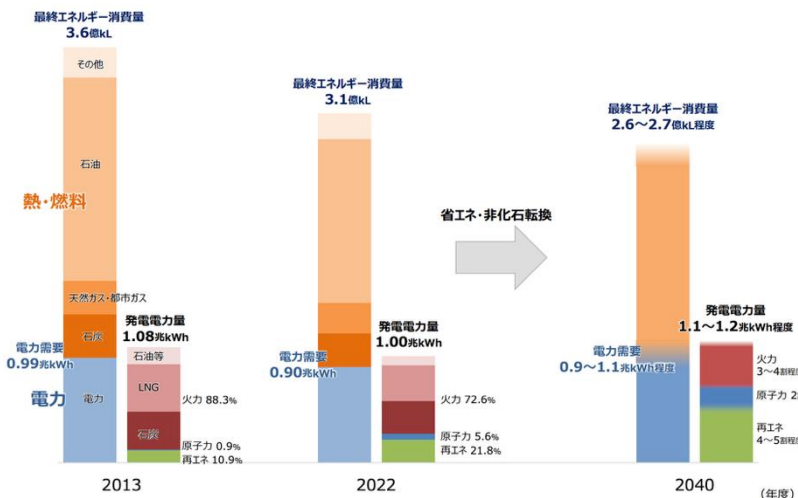


GFMインバータ技術
（エネルギーネットワーク研究チーム）

日本の政策・制度的背景

- グリーン成長戦略（2020年12月）：「次世代インバータの開発・2030年代のグリッドコード化」を明記
- 第6次エネルギー基本計画（2021年10月）：
 - 再エネ36～38%@2030、「疑似慣性機能等を具備したインバータの導入などのための技術開発や制度的な検討を進める」ことを明記
- 第7次エネルギー基本計画（2024年12月）：
 - 再エネ40～50%@2040、「系統の安定性を支える次世代インバータ等の開発を進める」ことを明記
- OCCTO グリッドコード フェーズ3（2030年前後）：慣性力・同期化力の要件化が明示
- NEDO STREAMプロジェクト（2022～2026年度）：系統連系規程等への反映データ取得が目標

電源構成に占める再エネの割合が4～5割程度



出典：第7次エネルギー基本計画 2040年度におけるエネルギー需給の見通し

グリーン成長戦略における次世代インバータ等の位置づけ

- ②グリーン成長戦略
- 4. 重要分野における「実行計画」(1)-(ii)太陽光（抜粋）

太陽光発電は、（中略）、再エネの主力として導入が拡大してきた。（中略）、カーボンニュートラルの実現に向けては、更なる導入拡大が不可欠である。

① 次世代技術の開発

< 現状と課題 >

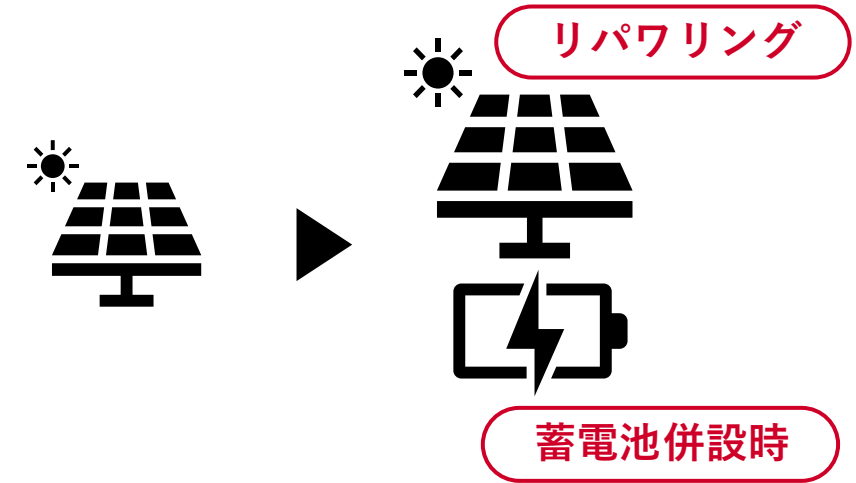
太陽光発電を始めとした変動再エネ導入の増加は、火力発電の減少とあいまって非同期電源の増加をもたらすことから、**慣性力の確保等も系統安定化のために必要**となる。

< 今後の取組 >

慣性力を提供する次世代インバーターや系統制御方式の技術開発を進め、2030年代からグリッドコード化や市場開設を通じて、慣性力の確保等を図る。

出典：経済産業省 グリーン成長戦略

- 太陽光＋蓄電池ハイブリッドPCSがGFMの主要搭載対象
 - 蓄電池がエネルギー源として慣性を「提供」する
 - PV単独よりもPV+BESSの方がGFM適用に適している
- 現行GFLのPCSと何が変わるか
 - ソフトウェア（制御アルゴリズム）の変更が基本
 - DSP・FPGAなどの制御ハードウェアの性能に依存する場合あり
- GFM搭載PCS（インバータ）が提供できる付加価値
 - 系統安定化サービス（慣性応答・電圧支持）
 - 将来の調整力市場・容量市場でのサービス提供
 - マイクログリッド・自立運転への応用



GFM適用検討の時期

海外動向（グリッドコード・要求仕様）

世界のGFMインバータに係るグリッドコード・標準化等の動向

- ・ 欧米豪を中心にルール形成、要件議論が進展
- ・ 欧州がグリッドコード（電源を系統に接続するルール）によるGFM機能義務化を検討、2026年に発行見込み
- ・ 米豪は、GFM要求仕様を公開し、複数のGFM導入に係る実証・商用運用が開始

欧州

2016-2019 MIGRATE事業(EU Horizon)
2017-2018 GFMの必要性を提唱(ENTSO-E)
2018-2021 OSMOSE事業(EU Horizon)
2020 ドイツVDEがHVDC向けGFMガイドライン発行
2022 英国National GridがGFMをグリッドコード化
2025 ENTSO-EがRfG2.0に向けてGFM能力の技術報告を公開
2026 欧州がGFMの義務化を予定(RfG2.0)

日本

2019-2021 GFM基盤技術開発(NEDO)
2022-2025 GFM実用化技術開発(NEDO)
2030年前後にGFMに係るグリッドコード改定を検討

豪州

2021 GFMに係る白書を発行(AEMO)
2023 GFMに係る仕様を公開(AEMO)
ARENA事業：8つの蓄電池GFMプロジェクトが進行中

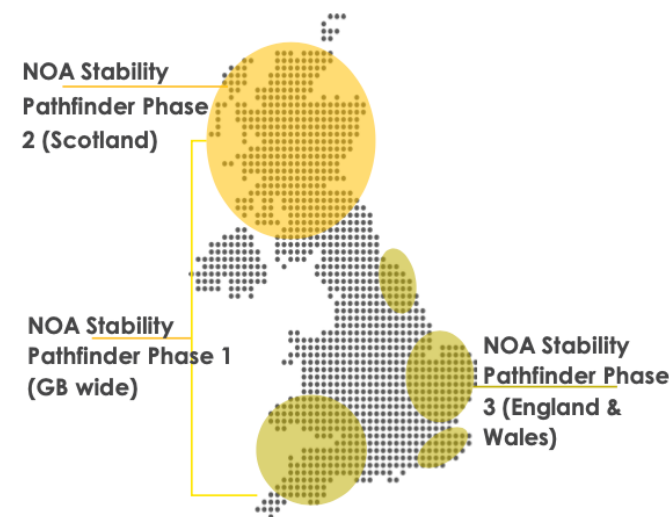
米国

2016-2018 SuNLaMP事業(DOE)
2021 SETO事業UNIFIコンソ設立(DOE)
2021 GFMに係る白書を発行(NERC)
2021 UNIFI, ERPI, WECC GFM標準モデル（初版）を公開
2022 UNIFIがGFMの要求仕様を公開
ハワイ電力は、PPA公募時にGFM機能を要件化
2023年当時世界最大の蓄電池GFM（185MW/565MWh）が運開
2023 NERC GFM機能・仕様白書を発行
2024 MISO; GFM標準仕様案（ver. 0.2）を公表
2026 UNIFIがGFMの要求仕様（第3版）を公開

- 2022年、GFMに関する世界初のグリッドコード「GC0137：GB グリッドフォーミング（GBGF）能力に求められる必要最低限の仕様」が発効
- 世界初のイナーシャ市場「Stability Pathfinder」が開始され、系統安定化のためにGFMインバータを活用するビジネスモデルが創設
- この市場入札で、**GFM蓄電池システムの提案が5件採択**

	Stability Pathfinder Phase 1	Stability Pathfinder Phase 2	Stability Pathfinder Phase 3
Requirement	Inertia and dynamic voltage GB wide	Inertia, SCL and dynamic voltage	Inertia, SCL and dynamic voltage
Status	Tender concluded in Jan 20 with most units now live	Tender concluded in Apr 22. Go-live from Apr 24	Tender period - Commercial window now closed. Go-live expected from 2025
Participating technology	All Synchronous Compensators	5 Synchronous and 5 Grid Forming Converter based	29 Synchronous based
Procurement regions	GB wide	Scotland	England and Wales
Procurement volume	12.5 GW.s of inertia	8.4 GVA of SCL 6 GW.s of inertia	7.5 GVA of SCL 15 GW.s of inertia

<https://www.nationalgrideso.com/future-energy/projects/pathfinders/stability>



ESO

Xiaoyao Zhou, "ESO Grid Forming (GFM) development," WISO 2023

オーストラリア：ARENA GFM 蓄電池プロジェクト

- 2022年12月、ARENAは、GFMインバーター技術を用いた8つの系統蓄電池プロジェクトに1億7600万豪ドルの条件付き資金を提供
- 従来、石炭やガス火力などの同期発電によって提供されてきた系統安定に不可欠なサービスがGFM技術によって引き継がれる
- プロジェクト総額は27億豪ドル、発電容量は2.0GW/4.2GWh、多くは現在「試運転（コミッショニング）」または建設中だが2026年中に大半のプロジェクトがフル稼働（FCAS（周波数制御サービス）市場）



In operation

- 1- Dalrymple BESS - 30 MW / 8 MWh (SA)
- 2- Hornsdale Power Reserve - 150 MW / 193.5 MWh (SA)
- 3- Wallgrove - 50 MW / 75 MWh (NSW)



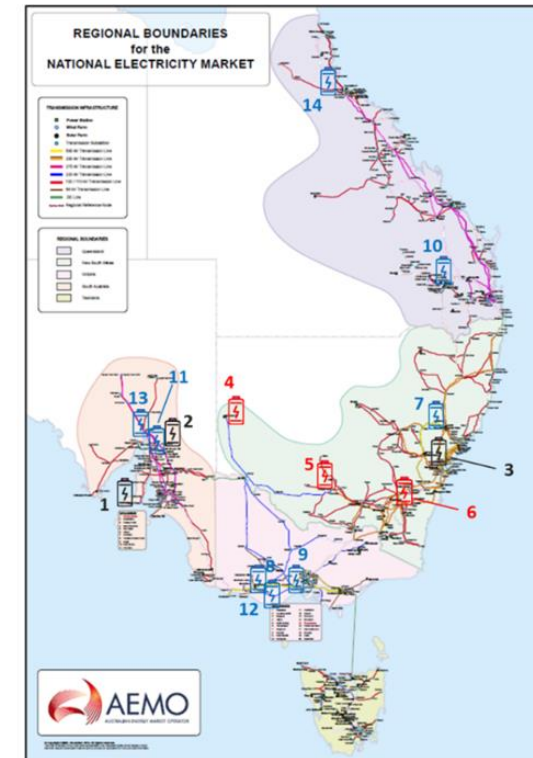
Under construction / commissioning

- 4- Broken Hill - 50 MW / 100 MWh (NSW)
- 5- Riverina/Darlington Point - 150 MW / 300 MWh (NSW)
- 6- Capital - 100 MW (NSW)



ARENA Funded

- 7- Liddell - 250 MW / 500 MWh (NSW)
- 8- Gnarwarre - 250 MW / 550 MWh (VIC)
- 9- Moorabool - 300 MW / 450 MWh (VIC)
- 10- Hopeland - 200 MW / 400 MWh (QLD)
- 11- Blyth - 200 MW / 400 MWh (SA)
- 12- Mortlake - 300 MW / 900 MWh (VIC)
- 13- Bungama - 200 MW / 400 MWh (SA)
- 14- Mount Fox - 300 MW / 600 MWh (QLD)



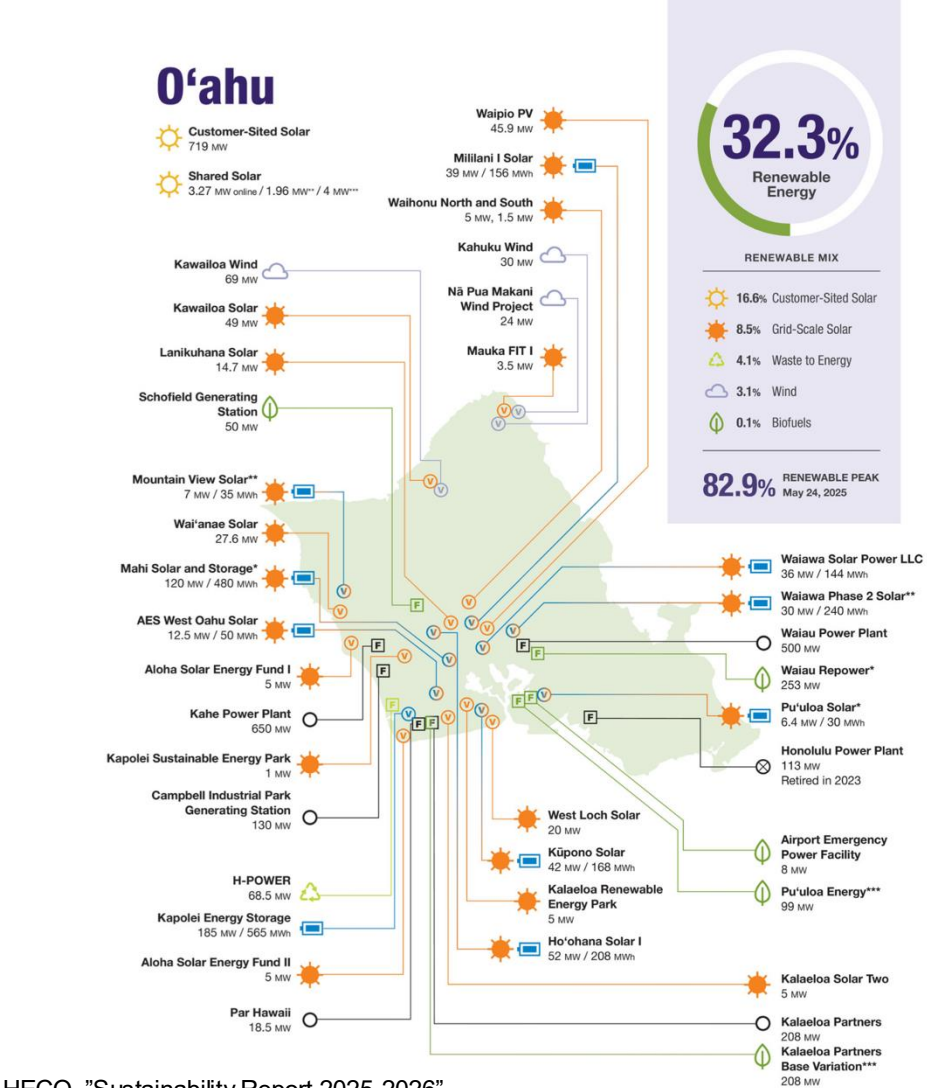
米国ハワイ州 PPA公募にGFM機能を要件化

- PUC（公共事業委員会）により、再エネ発電所は競争入札が要件
- **PV等への蓄電池併設が要件化**
- 2019年以降、**すべての提案プロジェクトにGFM機能を要求**
- 稼働当時（2023年12月）世界最大のGFM付き蓄電池（Kapolei Energy Storage、185MW/565MWh）が運転開始
- GFM機能付きPV+BESS が続々稼働：2024～2025年に4件（184MW / 736MWh）が新規稼働
- 現在の状況（Status Board、2025年12月23日更新）：

カテゴリ	GFM 対象
稼働済み	Kapolei 185MW / 565MWh
新規稼働	4件 184MW / 736MWh
承認済み	3件 77MW / 435MWh
交渉中	6件 332MW以上 + BESS

注記：GFMが要件化されていない案件も並行して存在する

HECO, "Hawaiian Electric Renewable Project Status Board"



HECO, "Sustainability Report 2025-2026"

4

*Awaiting approval **In progress ***In negotiation

産総研のGFMインバータに係る取り組み



WP1 GFMインバータの開発（東電HD・東電PG・電中研・産総研・環エネ技研）

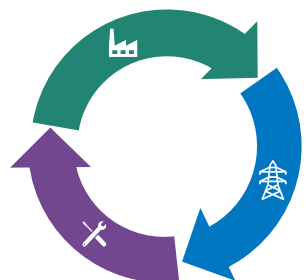
- ✓ 要求・仕様の検討
- ✓ 試作機的设计・開発（BESS & PV）→ 国内メーカーと連携



WP2 GFMインバータの検証および試験技術の開発（電中研・産総研・JET等）

- ✓ 試作機によるラボ試験および模擬系統試験

ラボ試験：スマートシステム研究棟



ラボ試験（産総研）

- ✓ 認証を見据えた試験法の開発
- ✓ HIL技術を活用した系統影響評価

模擬系統試験（電中研）

- ✓ 実規模の配電系統における試験
- ✓ ラボ試験では困難な実証に近い試験

試作機の改良

- ✓ 系統連系試験・要求仕様への適合
- ✓ 要求仕様改善に向けた提言



模擬系統試験：赤城試験センター



アウトプット

グリッドコード※改訂に向けた
知見・データ等の提供

※ グリッドコード

電源を系統に接続するルール



WP3 系統安定性評価技術の開発（産総研・広大・北大・東大・早稲田）

- ✓ シミュレーションによる系統影響評価および将来シナリオの検討

電力機器（PCS等）の先端研究開発や評価試験を支援する世界最大級の設備。

- ・ 国内唯一の大型インバータ対応の試験設備
- ・ 世界最大級の系統模擬電源（Grid Simulator）を活用してGFMインバータの系統連系試験を実施。
- ・ GFMインバータの試験を通じて、設備側の試験可能・許容範囲を確認。
- ・ 国内で初めて大型系統模擬電源による次世代ラボ試験（P-HIL）を実施。▶次頁で説明



世界最大級の電源容量を誇るパワエレ開発・試験設備



産総研が開発した次世代ラボ試験技術（HIL）

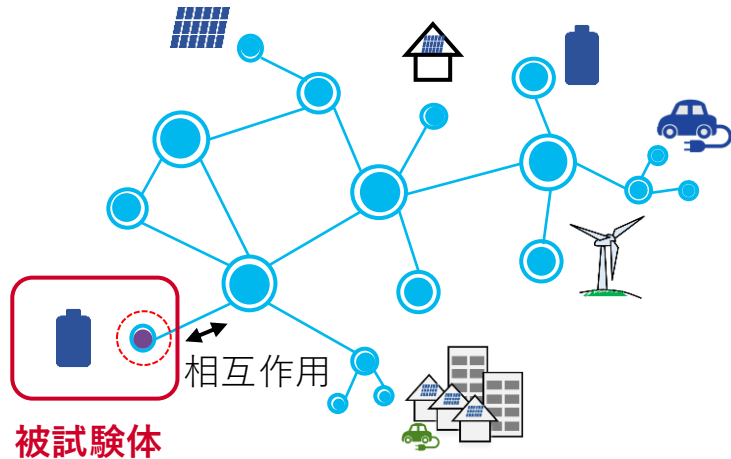
次世代ラボ試験技術（Power Hardware-In-the-Loop）とは

実機と仮想システムを接続し、現実に近い条件での試験を可能とするP-HIL技術を実現

- ・ 通常では困難な系統事故の再現や、電力系統との連系時における影響・効果の室内実証が可能に
- ・ 大型装置に対応したP-HIL技術は、国内唯一・世界最大級の7.5MVA級試験設備で検証済み

従来の実証試験

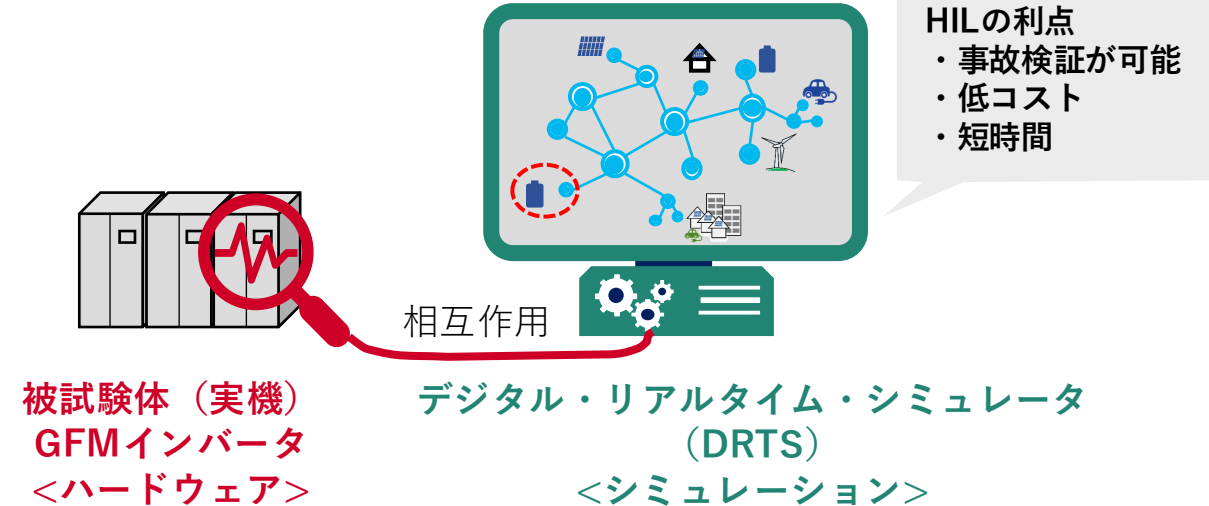
実際の電力系統 / 実証フィールドでの検証



実証試験の課題
・ 事故検証が困難
・ 高コスト
・ 時間がかかる

次世代ラボ試験（HIL）

実機 × シミュレーション



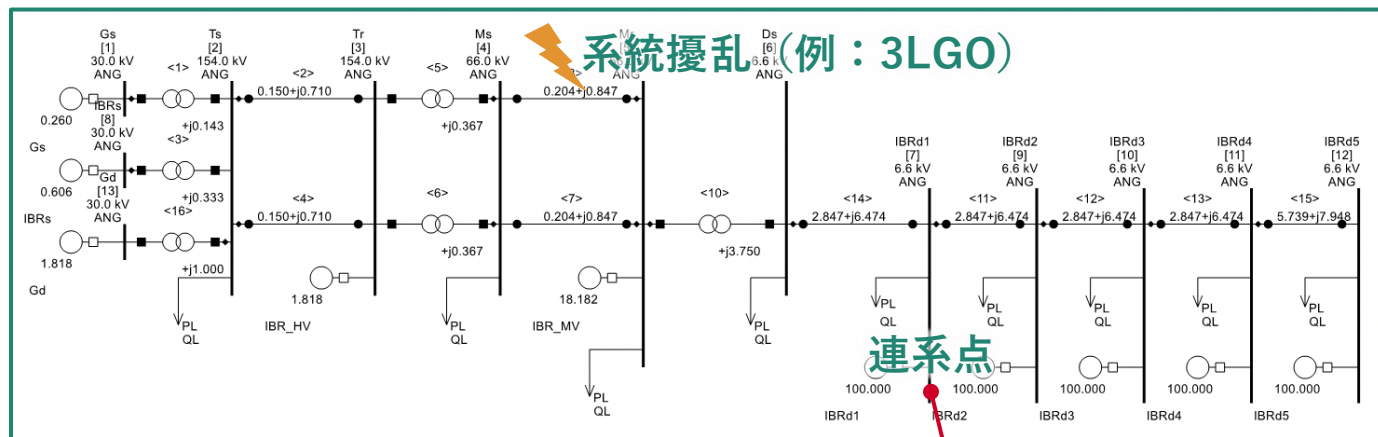
HILの利点
・ 事故検証が可能
・ 低コスト
・ 短時間

※HIL（Hardware-In-the-Loop）：実機ハードウェアを模擬環境に接続し、仮想的なシステムやシナリオとリアルタイムに連携させることで、現実に近い状態で評価・試験を行う技術です。
P-HILとは、実際の出力電力をフィードバックするHIL技術のことです。

将来の電力系統におけるGFMインバータの効果検証

P-HIL技術により将来の電力系統を再現し、GFMインバータを評価

- ・ 再エネ（IBRs）比率など将来の電源構成を想定した検証を実現
- ・ 5つの系統擾乱時のGFMインバータ能力を検証



DRTS

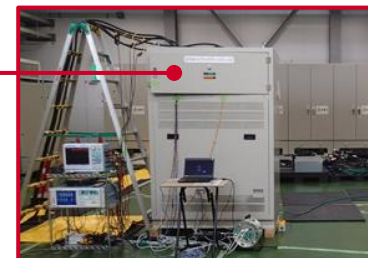
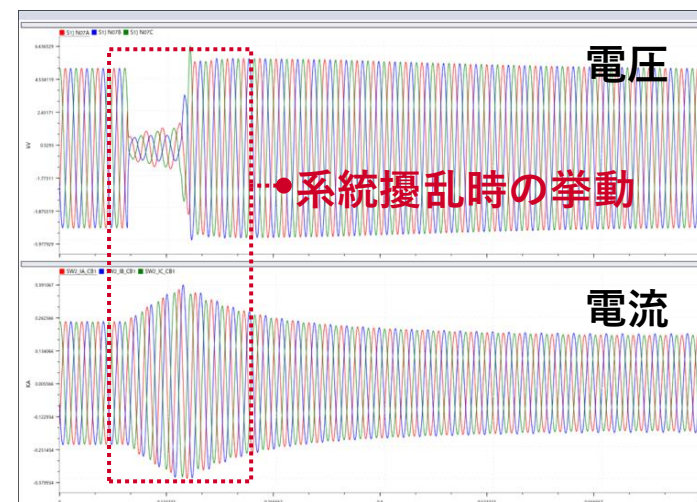
将来の電力系統を再現

- ・ 様々な系統擾乱を検証

系統模擬電源 Grid Simulator

連系点の電圧を再現

実系統では困難な系統擾乱時の
GFMインバータ挙動を検証可能



GFMインバータ実機

系統擾乱時の挙動を検証

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（No. JPNP22003）の結果得られたものです。

GFMインバータの限界性能と課題抽出

世界でも類を見ない各社1000ケース以上の膨大な試験を実施。

- ・ GFMインバータの試験手法（案）をとりまとめた。
- ・ 国内3社の限界性能の把握と課題抽出を完了。
- ・ 抽出された課題を踏まえて、要求仕様の明確化を進めていく。

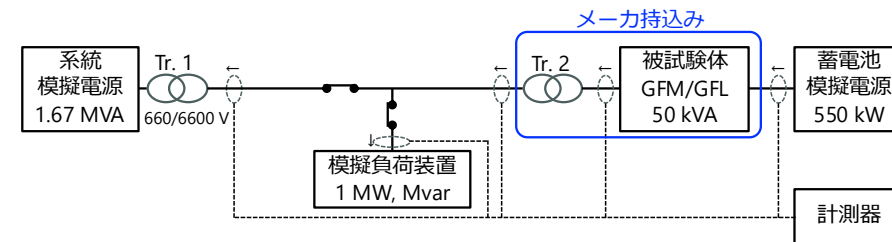


図. 機器構成の概略図



図. A社のラボ試験外観



図. B社のラボ試験外観



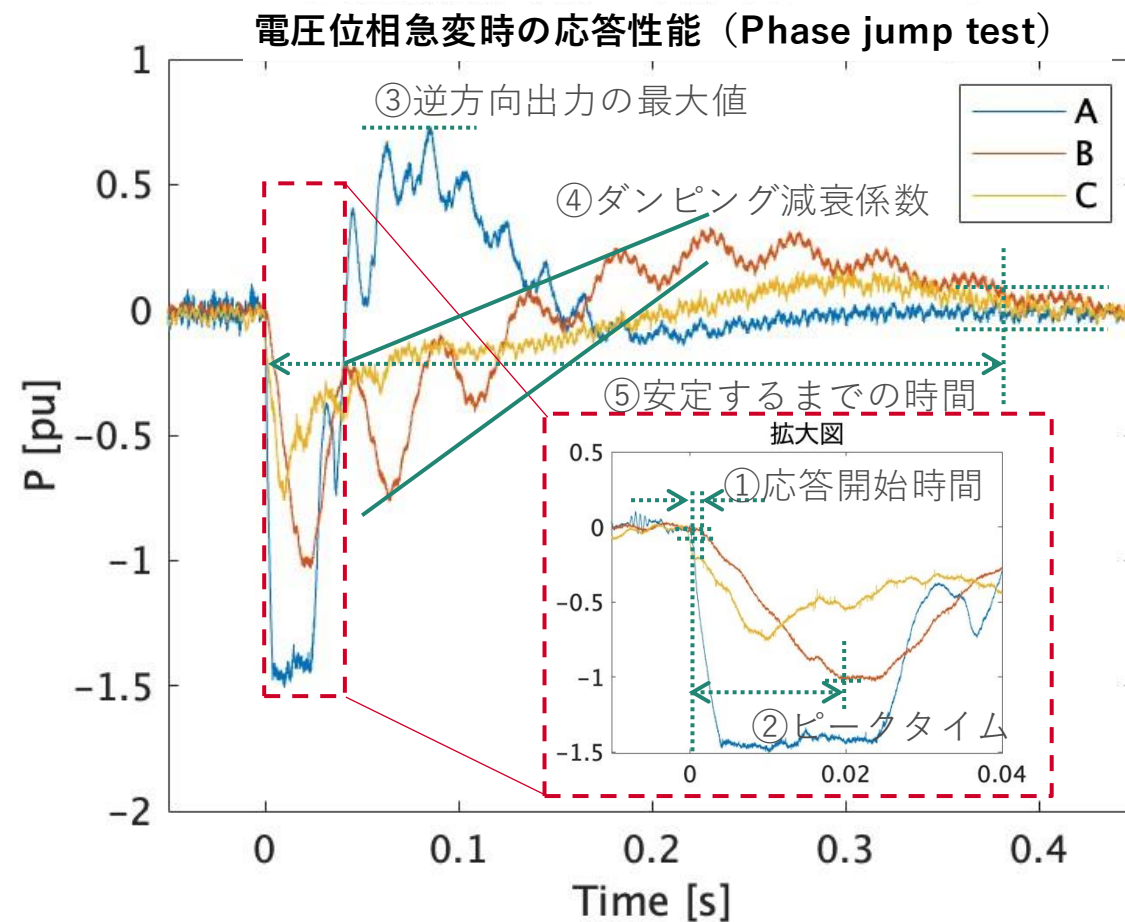
図. C社のラボ試験外観

産総研 スマートシステム研究棟（L室）

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（No. JPNP22003）の結果得られたものです。

異なる各メーカーの応答性能

- ・ 同じ試験条件で3社 3 様の試験結果
- ・ 要求仕様や評価基準の明確化を進めている



この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（No. JPNP22003）の結果得られたものです。

GFMインバータの同期安定性への貢献度を理論的にあきらかに

- ・ 過電流抑制方式を体系的に整理
- ・ GFM方式の違いによる事故時の運転継続能力を評価

用語の補足

- ・ 臨界故障除去時間 (CCT)
電源の運転停止に至らないために事故除去までに許される時間
- ・ 過電流抑制 (CL)
過電流を防止する機能
- ・ アンチwindアップ (AW)
windアップによる制御不安定化を補償する手法
- ・ 慣性定数 (H)
回転エネルギーを定格出力で除した値
- ・ 制動係数 (K)
回転速度を一定に制御する能力を示す指標 (ダンピング係数)

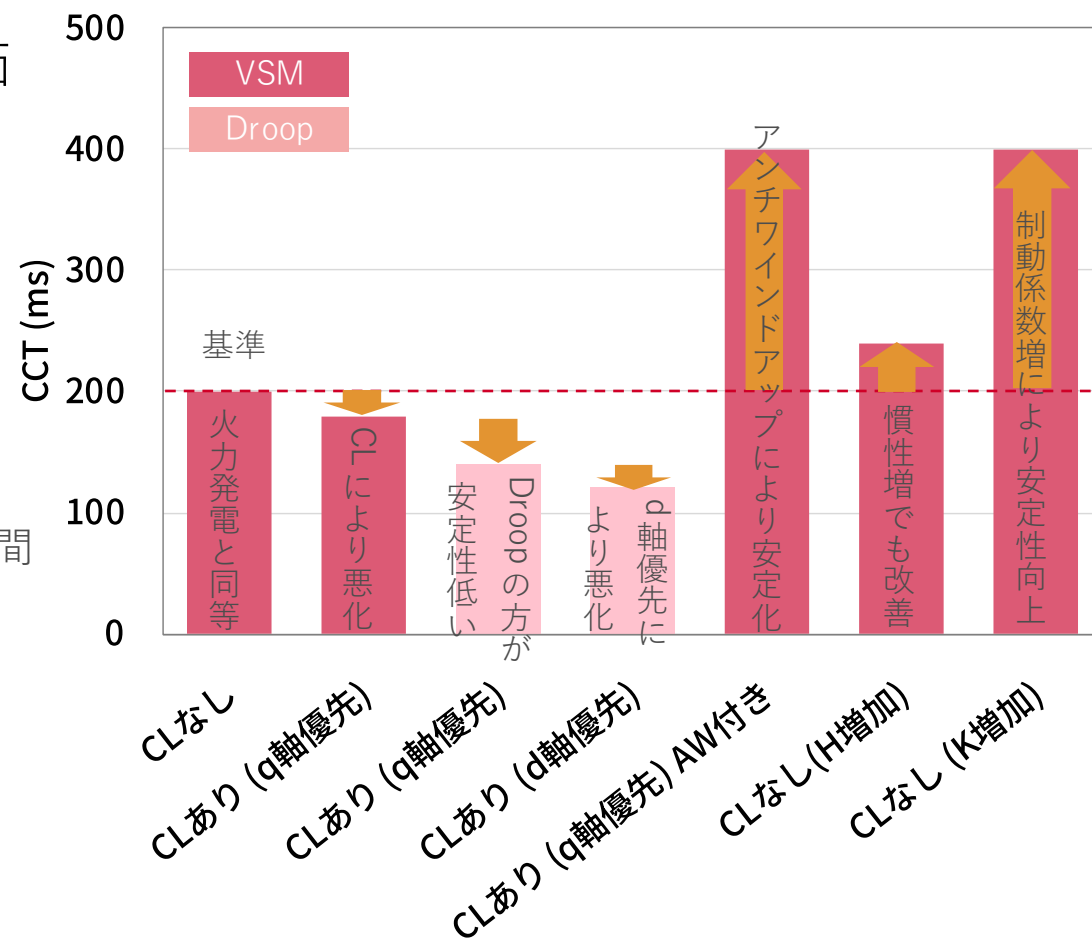


図. GFM制御方式別の安定化能力評価

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（No. JPNP22003）の結果得られたものです。

未来の電力システム解析等を担う人材育成に向けたHILテストベッド構築



HILテストベッドの例
(GFMインバータをPHIL試験する様子)



目的

人材育成向けHILプラットフォーム構築

- 大学・研究機関、民間企業等の人材育成に提供
- NEDO STREAM事業の設備・知見を活用
- 研究レベルから実用化段階に対応



内容

次世代ラボ試験・開発環境の提供

Hardware-
In-the-Loop
(HIL)

- 将来想定される複雑な電力系統下を想定した開発環境
- 様々な次世代電力機器（ハードウェア）とシミュレーションで再現された電力系統を組み合わせ、通常困難な事故イベントなどの相互作用・運用性を検証可能

目指す姿

先端技術開発の場として、
研修や共同研究の機会を提供



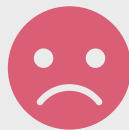
新技術の開発と並行して
次世代電力技術者の育成の場を目指す



産総研が有するコア技術

- ・ GFMインバータ制御
- ・ 評価・解析技術
- ・ 評価基盤

実験的・解析的に評価



実際の系統で事故等を
起こすことは困難



デジタルツイン (HIL)
技術の活用

電力系統を仮想的に再現
あたかも実際に連系した条
件をラボ試験で実現

<次世代ラボ試験技術>



本設備と次世代ラボ試験
技術を活用することで、
GFMインバータ等の
新技術を導入前に
プラント適合性試験を
行うことが可能です

Grid Simulator



AC capacity

7.5 + 5 MVA

AC voltage

up to 7.0kV

PV&Battery Simulator



DC capacity

Total 6.1MW

DC voltage

up to 2000V

Programable Load



Capacity

RLC 5.2MVar



SIRFN とは？

SIRFN (Smart Grid International Research Facility Network) は、知識共有と共同研究により、スマートグリッド技術の発展を目的とした国際連携の枠組み



国際協力 とは？

「国際協調が必要な研究・標準化等」を推進。研究報告やワークショップ等を通じた知識共有と普及活動

主な研究活動

6つの共同研究 (Joint Research Activities : JRA) が進行中

- ・ GFMインバータの試験法開発 (GFM Testing)
- ・ GFM向けPHILインターフェース技術開発 (PHIL IF)
- ・ IBRs自動試験プラットフォーム開発 (OpEN Test)
- ・ グリッドコードに対するHIL試験検討 (BoLT)
- ・ 電力のデータ空間技術 (Dataspace)
- ・ 系統試験に向けたDataSpace (FAIR-TEST)

IEA ISGAN : 25カ国 + EU ▶ WG5 (SIRFN) : 15カ国参画

- ・ 20名以上のアクティブメンバー
- ・ 17の研究施設



GFMインバータは再エネ主力電源時代の必須要件

- ・ 太陽光 + 蓄電池システムがGFM搭載の主要対象のひとつ
- ・ 海外では義務化とビジネスモデル化が進展
- ・ 日本は2030年前後のグリッドコード化に向け、技術開発・制度整備の準備段階

今後の展望と提言

- ・ 産総研はJET等と連携し、GFMインバータの試験法の提言と試験基盤の整備を推進
- ・ 国内外のPCSメーカはすでに対応機種の商品化を進めている
- ・ リードタイムを考慮するとGFMインバータの義務化の前に準備が必要



エネルギーネットワーク研究チーム
Webページ