



戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期
IoE社会のエネルギーシステム

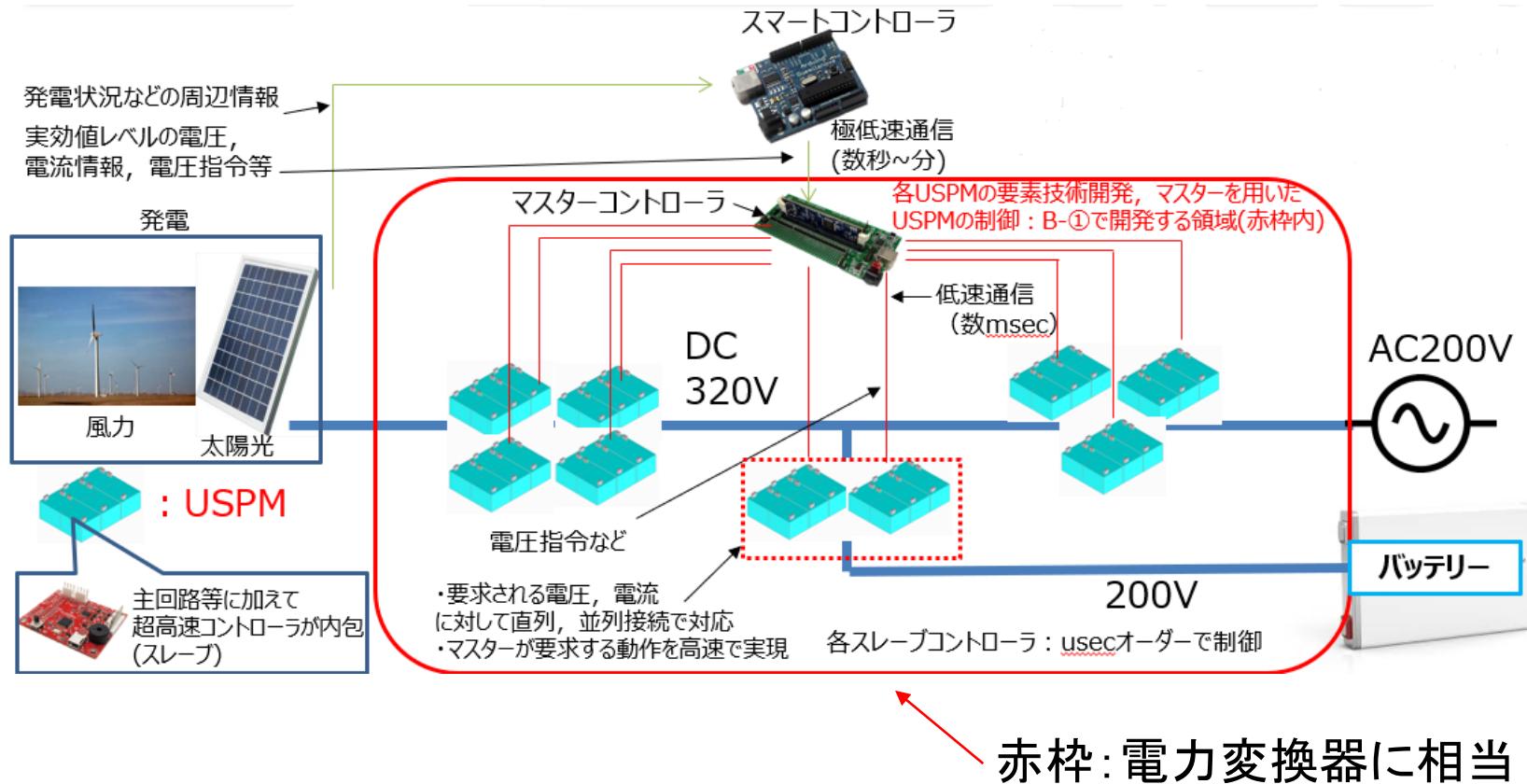
テーマB-①(1)

「超高速デジタル制御を有するノイズフリー
USPMとその応用技術の開発」

長岡技術科学大学 技術研究院
伊東 淳一

ユニバーサルスマートパワーモジュール(USPM)

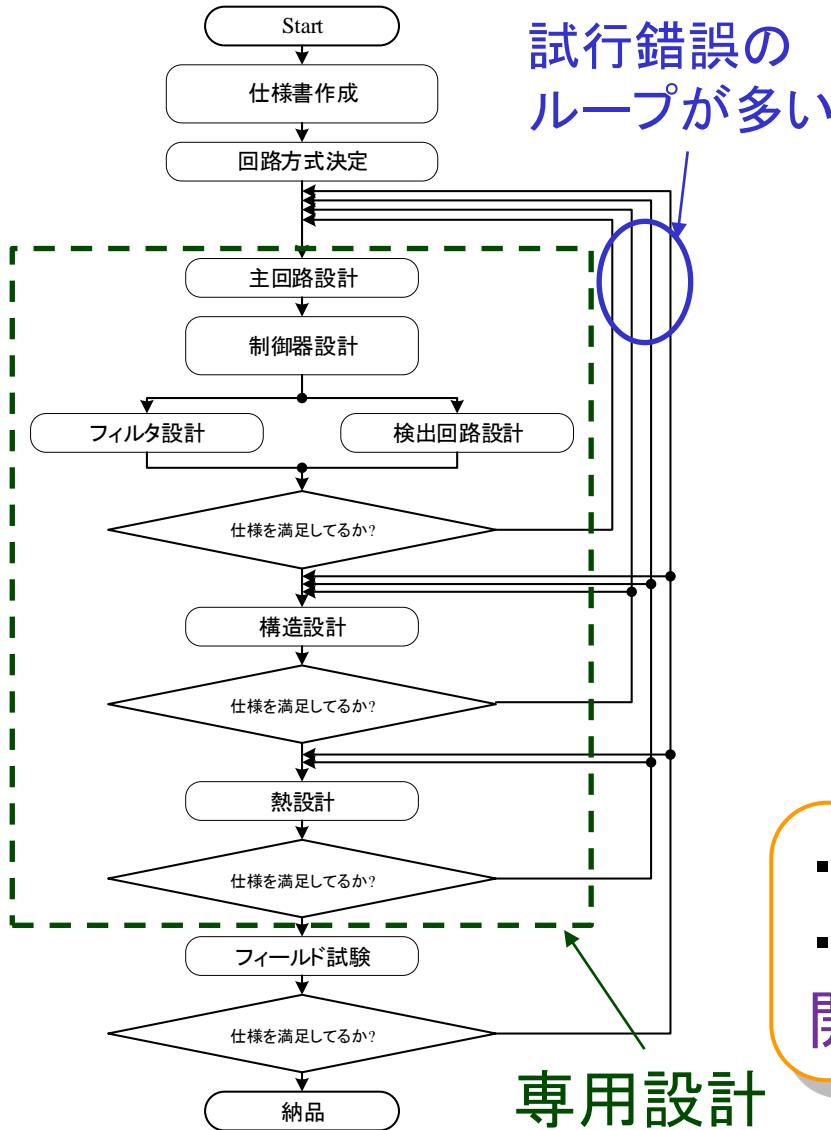
⇒電力変換器を1パッケージ化した高機能モジュール



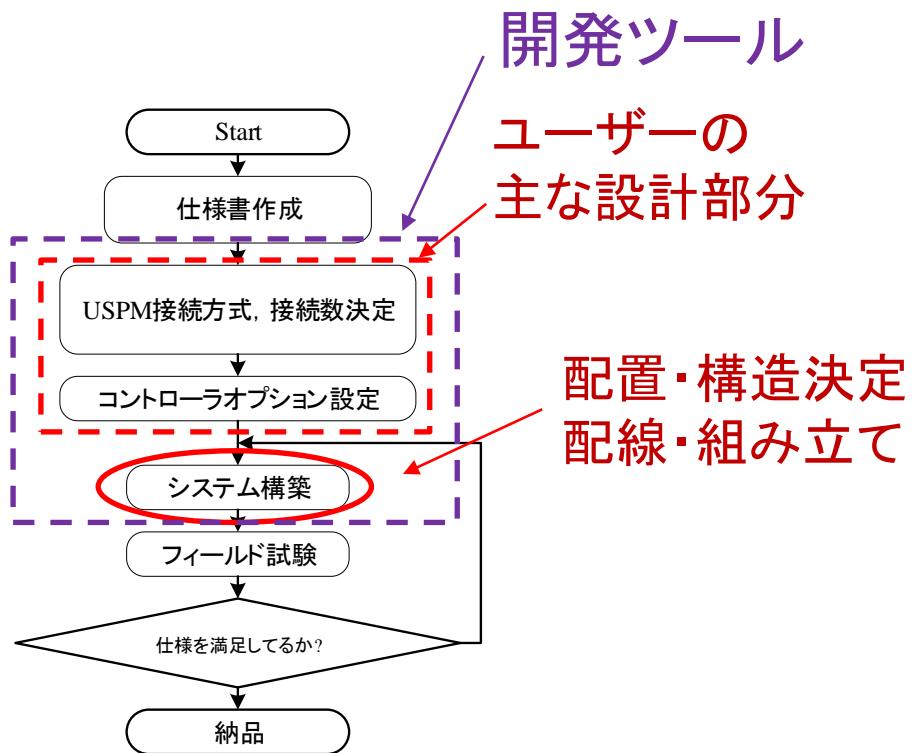
- ・USPMによって起こる技術革新: 電力変換器設計の標準化
- USPMの組み合わせのみであらゆる電力変換器を構築可能
(電力変換器設計を最小化)

背景_従来とUSPMにおける開発フローの違い

■ 従来電力変換システム



USPMシステム



- ・ループ数:少⇒開発時間・コスト:小
 - ・自由度が限られるため
開発ツールで容易に設計可能

国際競争力

評価軸	研究開発			
	SIP-USPM	PEBB(パワーエレクトロニクス ビルディングブロック)(欧州)	IPM(インテリジェントパワーモジュール) (日本, 米国, 欧州)	PM(パワーモジュール) (日本, 米国, 欧州)
電力変換効率	△ (最適設計された回路 よりは低効率)	△ (最適設計された回路 よりは低効率)	◎ (最適設計可能)	◎ (最適設計可能)
パワー密度	△ (最適設計された回路 よりは大型化)	△ (回路分割により 部品点数増加)	◎ (最適設計可能)	◎ (最適設計可能)
制御性能	◎ (超高速コントローラ 内包)	○ (汎用マイコンを使用)	○ (汎用マイコンを使用)	○ (汎用マイコンを使用)
汎用性	◎ (あらゆる変換器に対 応)	△ (用途指向型)	△ (用途指向型)	✗ (用途毎に専用設計 が必要)
メンテナンス	◎ (故障USPMのみ交換で 対応可)	△ (主回路交換のみ容易)	✗ (機器ごと交換)	✗ (機器ごと交換)
コスト(予測)	◎ (構成要素全て量産対応 可能)	○ (主回路のみ量産対応)	△ (パワーモジュールのみ量産対応)	✗ (設計コスト大)
市場性(予測)	◎ (部品のように扱い可)	△ (用途, 仕様ごとに専用設計)	△ (用途, 仕様ごとに専用設計)	△ (用途, 仕様ごとに専用設計)

USPMの優位性: **圧倒的な汎用性, メンテナンス性, 低コスト**
(理由: USPMのみによってあらゆる変換器を構築可能)

国際競争力_SIP終了時

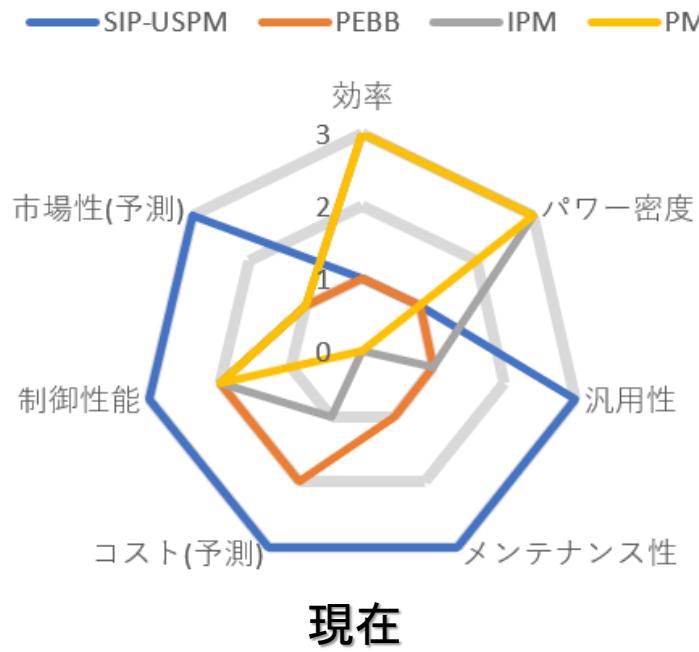
評価軸	研究開発			
	SIP-USPM	PEBB(パワーエレクトロニクス ビルディングブロック)(欧州)	IPM(インテリジェントパワーモジュール) (日本, 米国, 欧州)	PM(パワーモジュール) (日本, 米国, 欧州)
電力変換効率	※1 ○→◎ (最適設計された回路 よりは低効率)	○ (最適設計された回路 よりは低効率)	◎ (最適設計可能)	◎ (最適設計可能)
パワー密度	※2 ○→◎ (最適設計された回路 よりは大型化)	○ (回路分割により 部品点数増加)	◎ (最適設計可能)	◎ (最適設計可能)
制御性能	◎ (超高速コントローラ 内包)	○ (汎用マイコンを使用)	○ (汎用マイコンを使用)	○ (汎用マイコンを使用)
汎用性	◎ (あらゆる変換器に対 応)	△ (用途指向型)	△ (用途指向型)	✗ (用途毎に専用設計 が必要)
メンテナンス性	◎ (故障USPMのみ交換で 対応可)	△ (主回路交換のみ容易)	✗ (機器ごと交換)	✗ (機器ごと交換)
コスト	◎ (構成要素全て量産対応 可能)	○ (主回路のみ量産対応)	△ (パワーモジュールのみ量産対応)	✗ (設計コスト大)
市場性	◎ (部品のように扱い可)	△ (用途, 仕様ごとに専用設計)	△ (用途, 仕様ごとに専用設計)	△ (用途, 仕様ごとに専用設計)

(SIP終了時)効率, パワー密度が現在と比較して改善
 → USPMに適用する回路構成, デバイス等の最適化

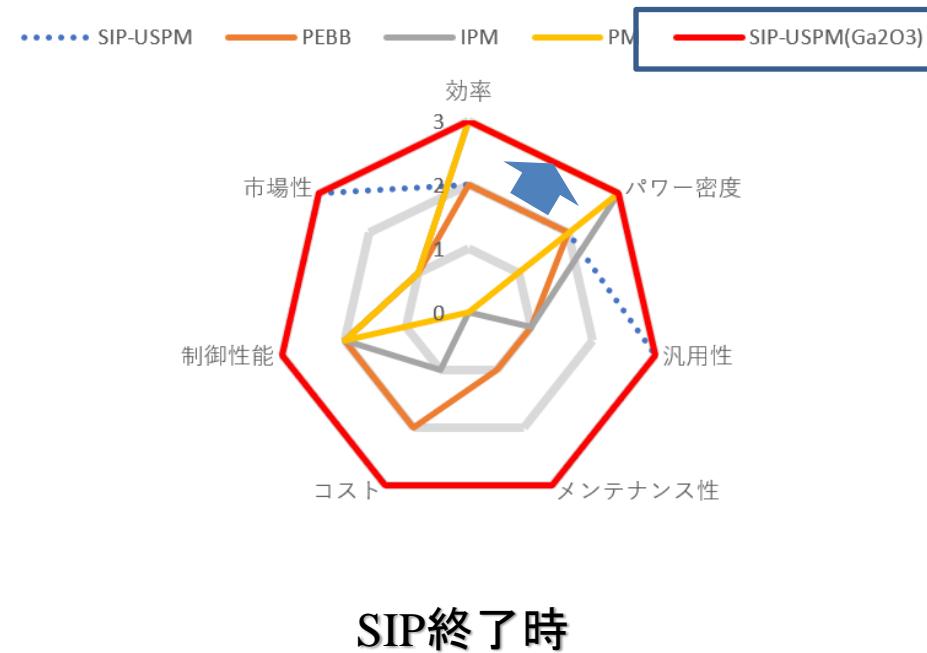
※1 B-①(3)で開発中のGa2O3 GaNデバイスの適用によりUSPMの効率大幅向上

※2 B-①(3)で開発中のGa2O3 GaNデバイスの適用によりUSPMのパワー密度大幅向上

レーダーチャート



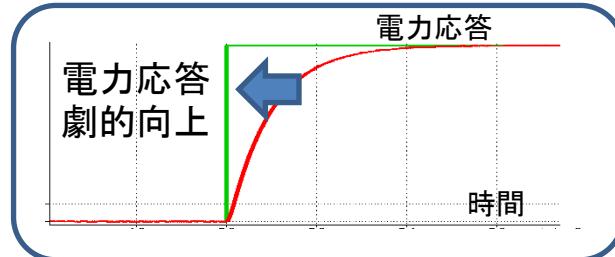
B-①(3)で開発中のGa₂O₃ GaNデバイスの適用
→USPMの効率とパワー密度大幅改善



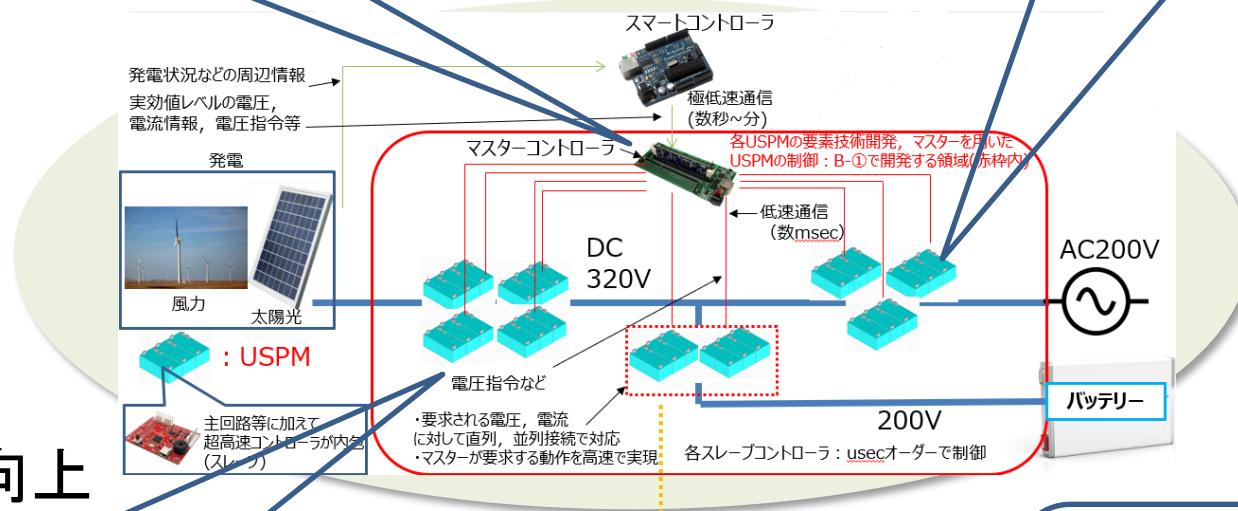
USPMの効率、パワー密度：最適設計された機器よりは**低下**

USPMを用いた電力変換システム：
汎用性特化のシステム設計に主眼

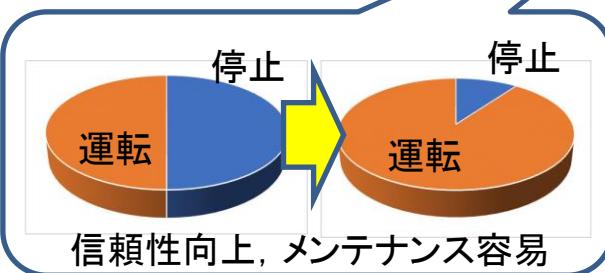
高速制御性



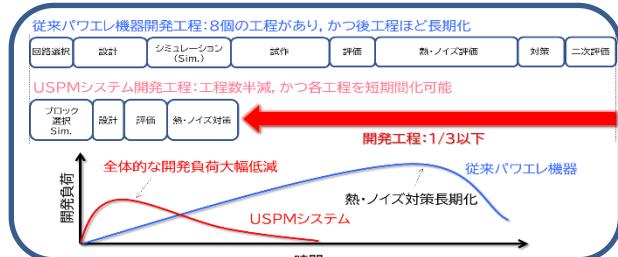
USPMを使ったシステム



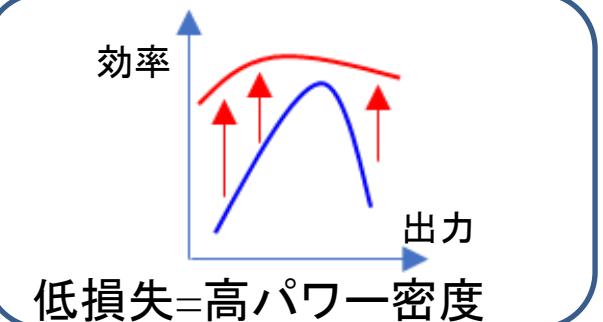
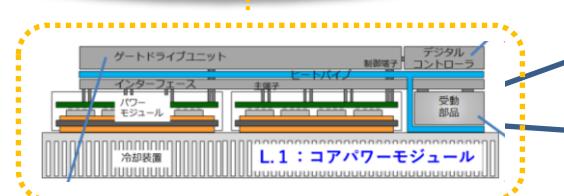
稼働率向上



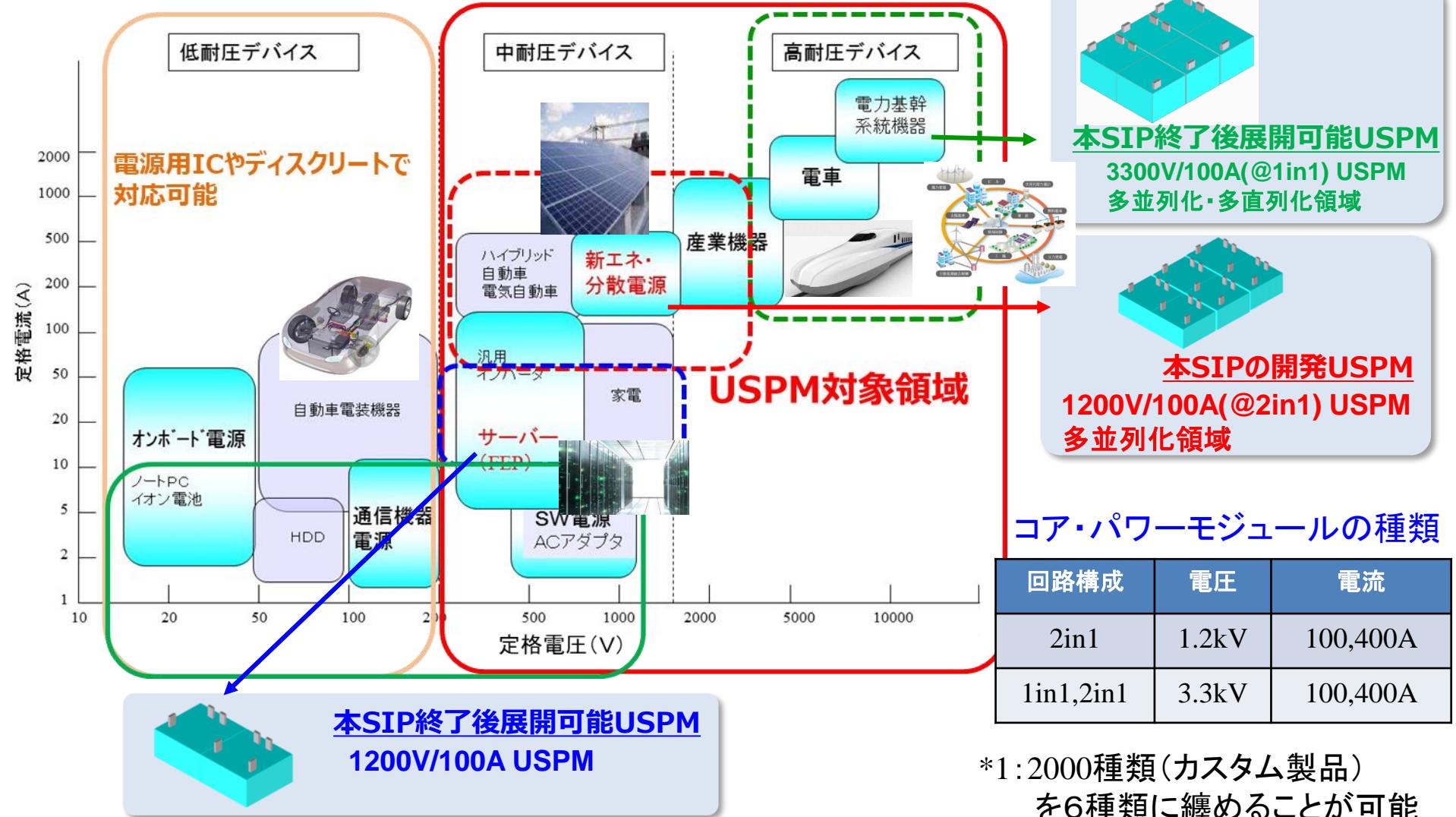
開発期間短縮



高効率



研究成果で期待される波及効果



- ・USPMによるあらゆる電源の設計の単純化
- ・大量生産によるスケールメリット(単価の劇的な低下)
- ・少ない設計リソースで数々の省エネ機器を生産可(パワエレ機器の普及拡大)

*1: 2000種類(カスタム製品)
を6種類に纏めることが可能

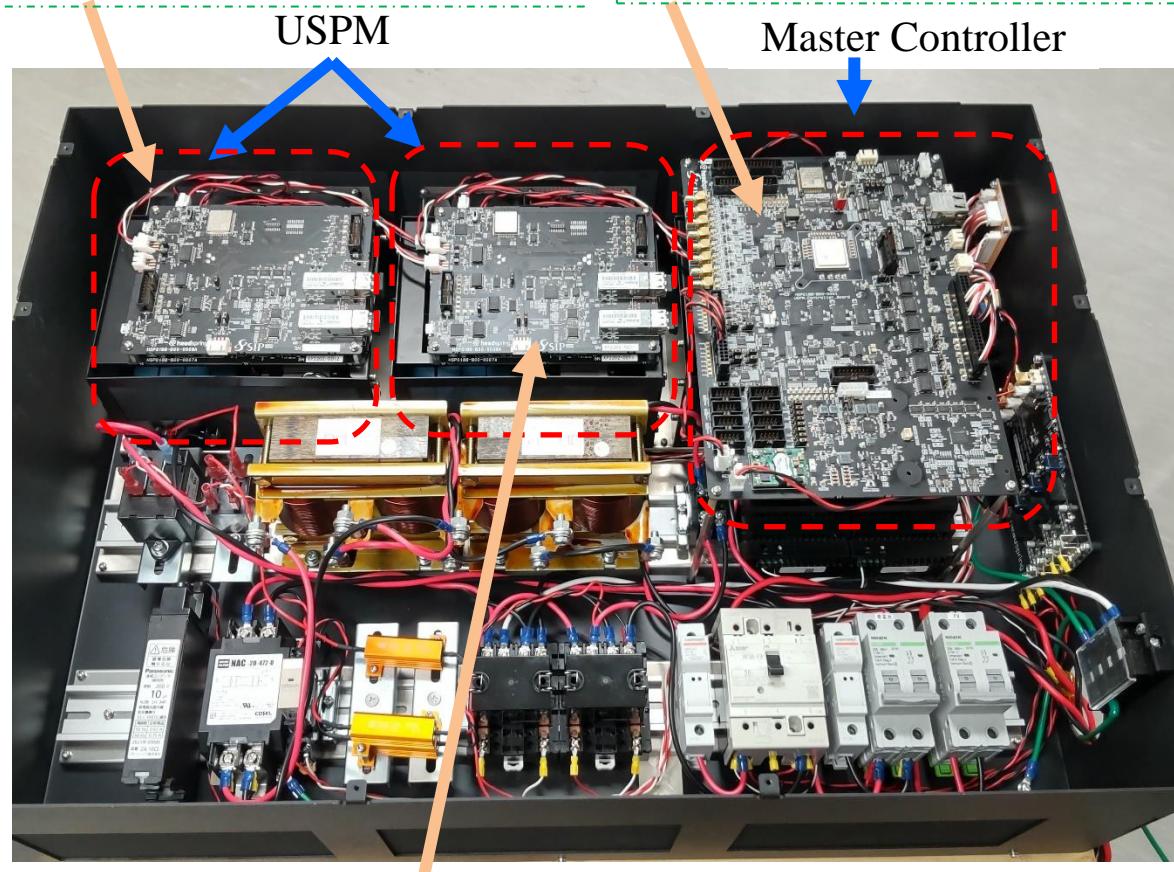
*2: 試作・評価は1200V/100A
にて実施

SIPで得られた主要な成果まとめ

USPMを使った蓄電システムを試作し実証

①広帯域アクティブコモンモードノイズキャンセラ
⇒幅広い周波数帯域でコモンモードノイズを
抑制可能なパッシブ/アクティブフィルタの実証

②超高速デジタル制御手法
⇒オーバーサンプリング技術と高速制御により
即応性や追従性、ロバスト性を大幅改善



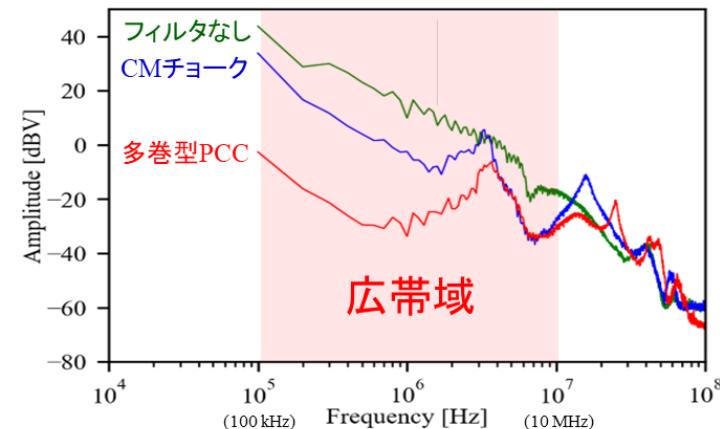
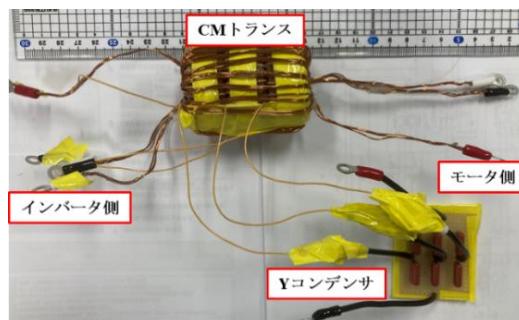
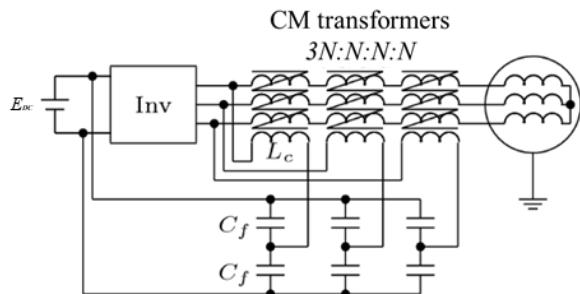
③多数台USPMの直並列制御手法
⇒多数台自律分散動作をドループ制御により安定化

SIPで得られた主要な成果①

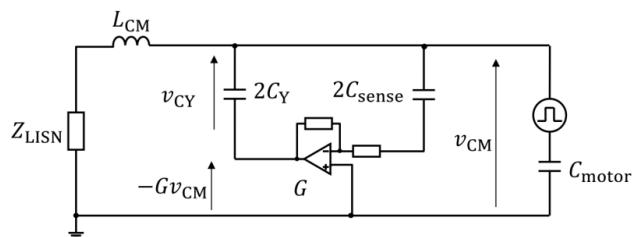
①広帯域アクティブコモンモードノイズキャンセラ

- ・パッシブ型, アクティブ型コモンモードノイズキャンセラを提案
- ・効果的にノイズを抑制可能であることを実証

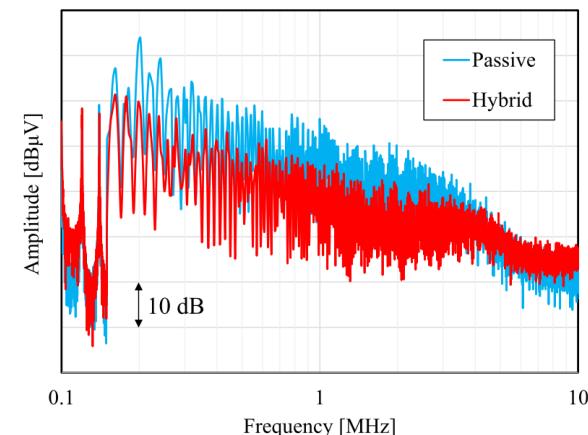
多巻型パッシブキャンセラ



アクティブノイズキャンセラ



ノイズ評価結果



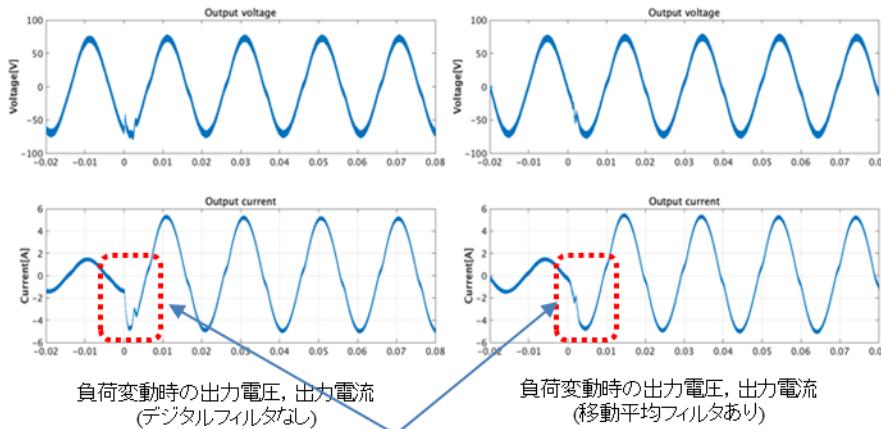
ノイズ評価結果

SIPで得られた主要な成果②

②超高速デジタル制御手法

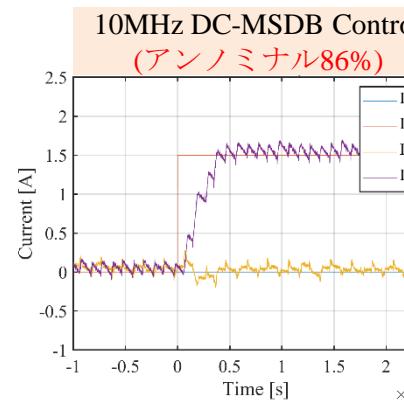
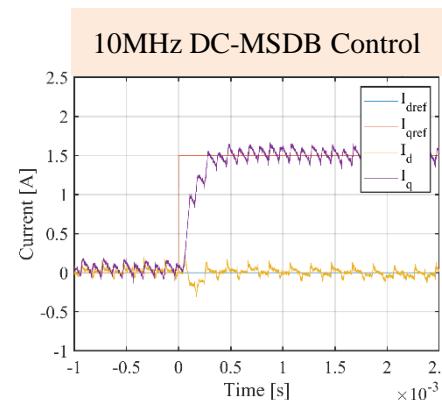
電流制御(ACR)に適用

- ・系統電力の位相に同期した定格相当の電流値が出力されていることを確認
- ・高速フィードバックと高速デジタル演算を実現
- ・驚異的なロバスト性と十分な速応性や追従性があることを確認



✓ 追従性能の向上を確認

- ・パラメータ変動に対する高いロバスト性

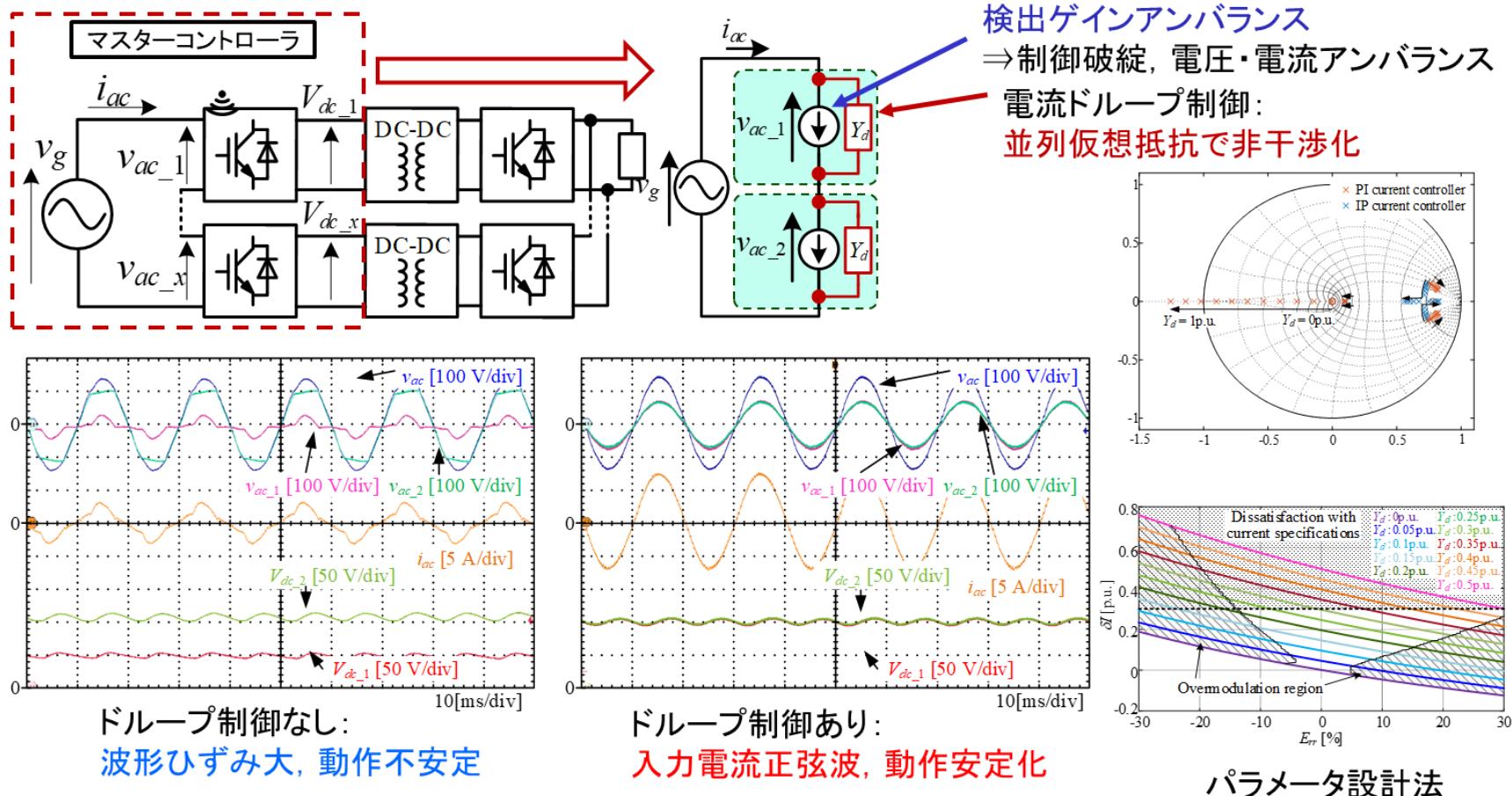


- 10MHz外乱補償型マルチサンプリングデッドビート(DC-MSDB)制御によりパラメータ変動に対して高いロバスト性を実現

瞬時デジタル駆動制御により高い制御性能が得られることを実証

SIPで得られた主要な成果③

③多数台USPMの直並列制御手法



多数台の直並列接続されたUSPMの動作を安定化する
ドループ制御の提案、および実証

最終目標

	達成目標（数値目標があれば記載）
①	項目名：アクティブゲートドライバの開発 目標：実際の仕様に基づく基板設計を行い、性能評価を行う（スイッチング周波数2MHz程度で動作）。
②	項目名：ノイズフリーEMCフィルタの開発 目標：多数台のUSPMに対して、フィルタの最適設計を行い、高周波アクティブノイズキャンセラの検証を行う（最終的にスイッチング周波数2MHzに対応するアクティブキャンセラ技術）。
③	項目名：瞬時デジタル駆動制御向け制御手法・ハードウェアの開発 目標：モジュール構成に応じたコントローラのバリエーション開発を完了し、ソフトウェアやFPGAを体系化する（電流応答100kHz以上）。
④	項目名：USPMのマスターコントローラとシステム応用技術開発 目標：蓄電装置応用を想定したUSPM機能の最適化を行う。またMMC方式による中圧（6.6kV）サーバー電源の基礎検証などの技術を確立する（損失従来比1/2の見通しを得る）。

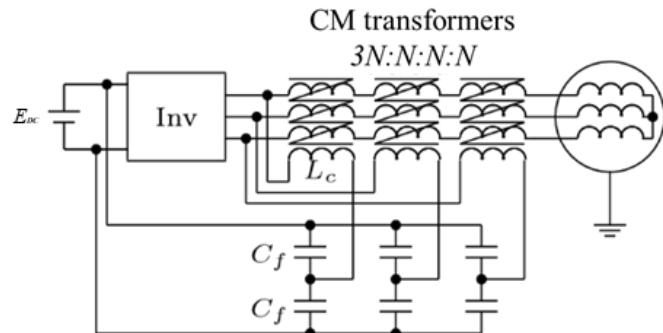
最終目標に対して得られた成果①

レイヤー2 ノイズフリーEMCフィルタ(北海道大学)

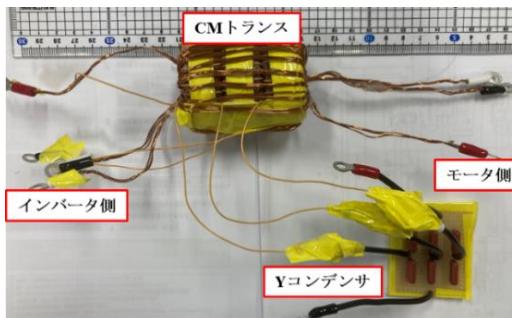
AC側に配置する多巻型パッシブコモンノイズキャンセラ(PCC)

①提案する多巻型PCCの構成

- ・3つのコモンモードトランスを用いて各相別々にCM電圧をキャンセル
- ・受動素子のみのシンプルな回路構成

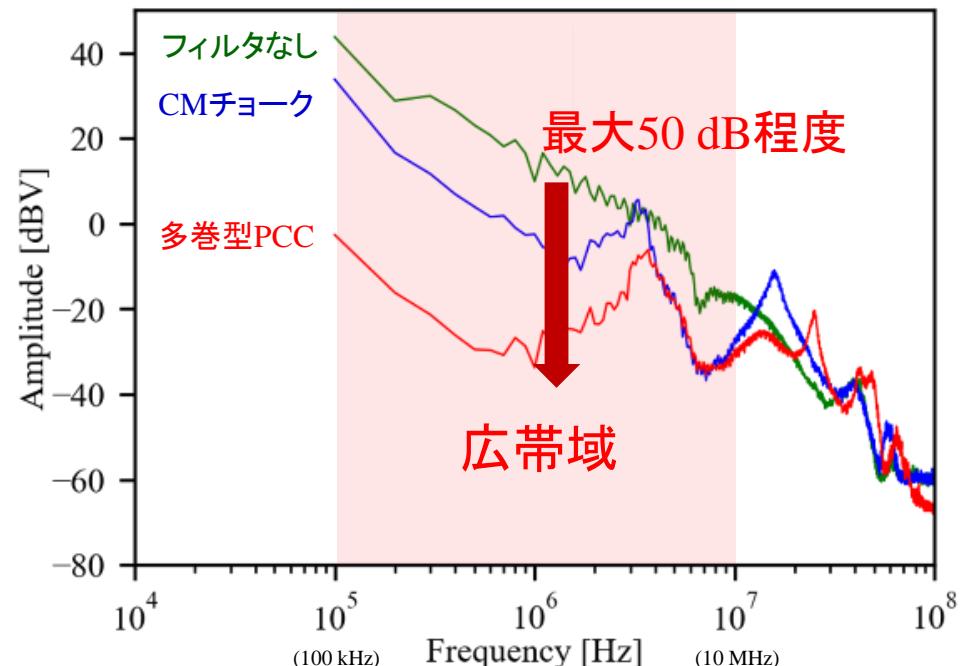


②試作したAC側配置の多巻型PCC



③実験におけるコモンモード電圧の周波数解析結果

- ・AC側配置の多巻型PCCによってスイッチング周波数(100 kHz)～10 MHz程度の広帯域でノイズ減衰



小型化(従来比:2/3以下に低減※), 軽量化を確認

※従来:大型の非零相チョーク&CM電圧検出用コンデンサが必要

最終目標に対して得られた成果①

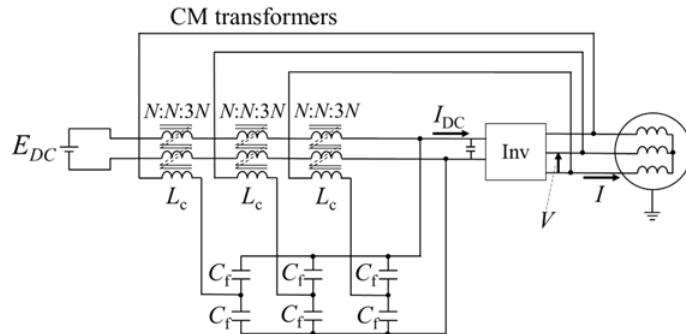
レイヤー2 ノイズフリーEMCフィルタ(北海道大学)

DC側に配置する多巻型パッシブコモンノイズキャンセラ(PCC)

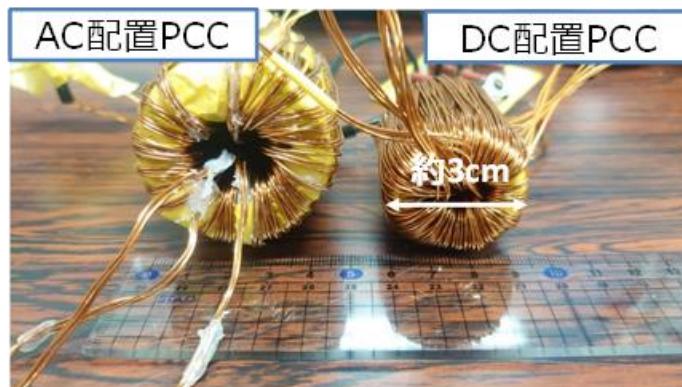
①提案する多巻型PCCの構成

AC側配置のPCCに対して

- ・総電流の小さなDC側に配置
- ・鉄心の小型化と銅損の低減

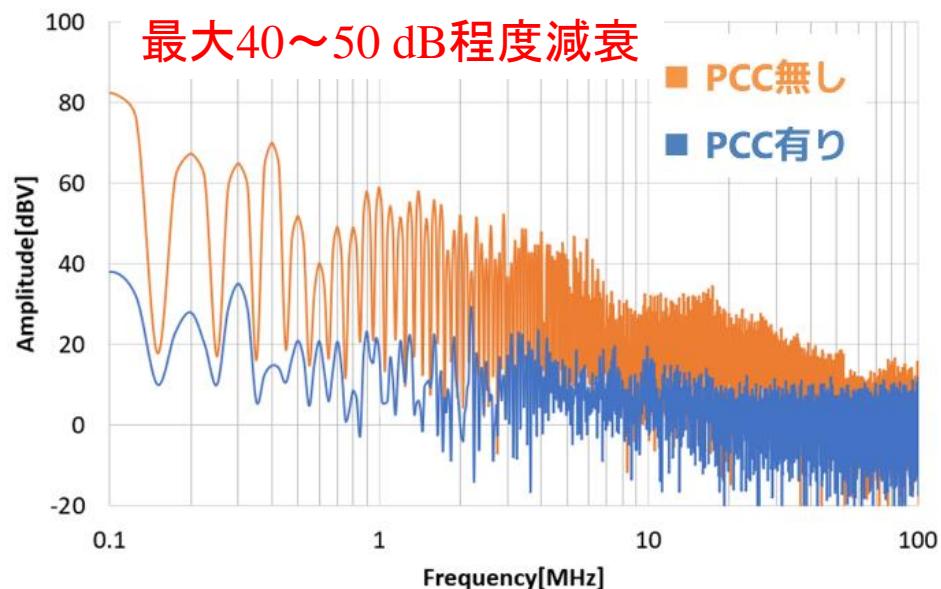


②試作したDC側配置の多巻型PCC



③実験におけるコモンモード電圧の周波数解析結果

- ・DC側配置の多巻型PCCによってスイッチング周波数(100 kHz)～50 MHz程度の広帯域でノイズ減衰(最大で40～50 dB程度)



AC側配置のPCCの82%に小型軽量化が可能

※DC-PCCのコア窓面積はAC-PCCのコア窓面積の82%未満となるため

最終目標に対して得られた成果①

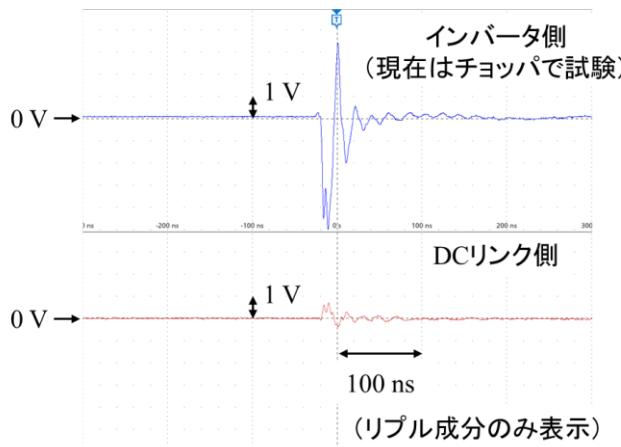
レイヤー2 ノイズフリーEMCフィルタ(北海道大学)

DCリンクコンデンサの等価直列インピーダンスにより発生するDMノイズを抑制する
たすき掛けコンデンサバンク

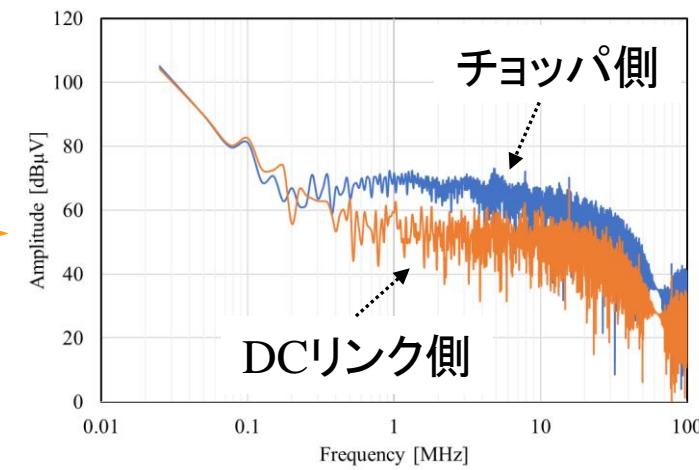
①たすき掛けコンデンサバンクの構成

- ・2つのコンデンサバンクの両端をインダクタと抵抗でたすき掛けに接続した交流ブリッジ回路
 - ✓ コンデンサの等価直列抵抗(ESR)と等価直列インダクタンス(ESL)に等しいインダクタと抵抗を接続することで、コンデンサのESLによるDMノイズを抑制
- ・ESRとESLは小さいため、**プリント基板**で構成可能 → 小型、低コスト

②実験結果

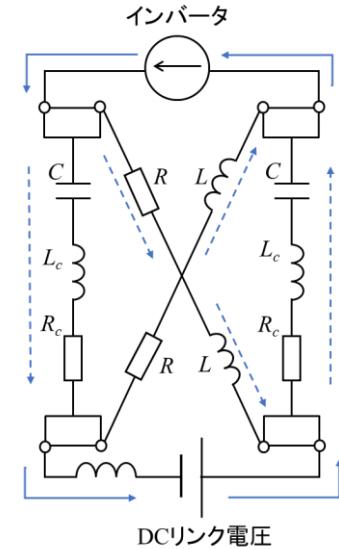


周波数解析



DCリンク側のリップル電圧の低減を確認

広帯域で平均15 dB低減



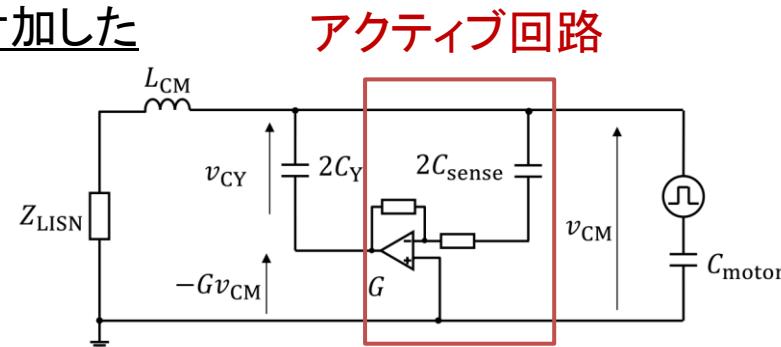
最終目標に対して得られた成果①

レイヤー2 ノイズフリーEMCフィルタ(北海道大学)

L形ハイブリッドEMIフィルタ

①L型コモンモード(CM)フィルタにアクティブライン回路を付加したハイブリッドEMIフィルタ

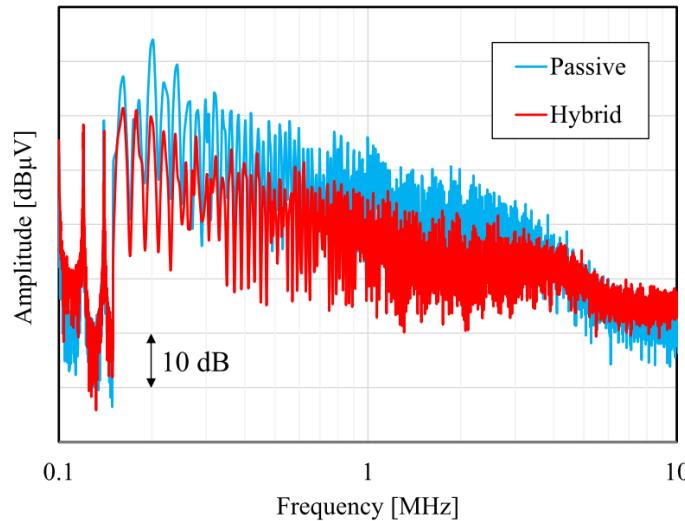
- モータの浮遊容量が小さければ、CM電圧は汎用オペアンプで扱えるレベルであり、CM電流も電流バッファを用いることで扱えるレベル
- Yキャパシタのコンデンサ容量が等価的に $(1+G)$ 倍



②実験における雑音端子電圧の確認

- パッシブフィルタと比べ、従来は対策が難しかった150 kHz ~ 4 MHzまでハイブリッドフィルタが12 dB程度抑制(ノイズ量1/4)
- アクティブライン回路は電子回路のみで構成されるため、体積増加はほぼ無し

L型パッシブにアクティブライン回路を追加によりノイズ低減効果を向上を確認

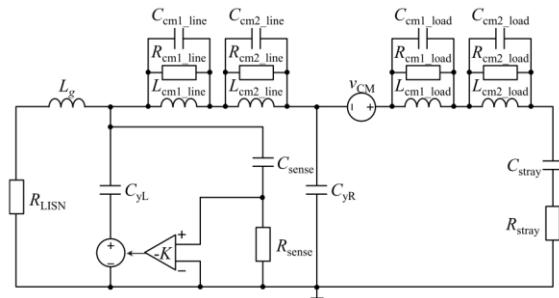


最終目標に対して得られた成果①

レイヤー2 ノイズフリーEMCフィルタ(北海道大学)

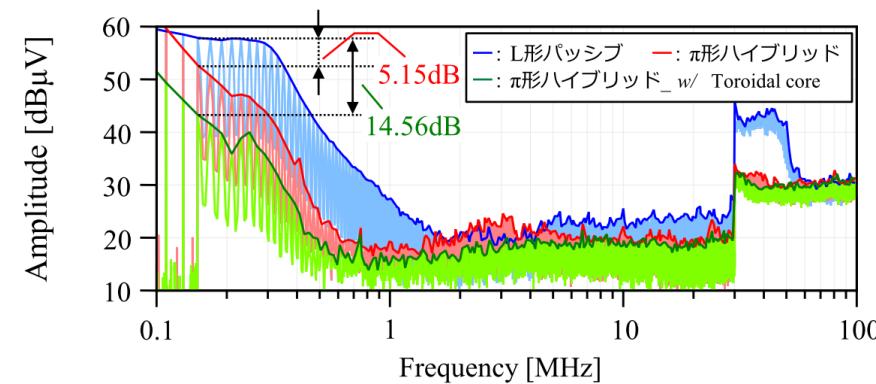
π形ハイブリッドEMIフィルタ

- ① π型コモンモード(CM)フィルタにアクティブ回路を付加したハイブリッドEMIフィルタ
・π型CMフィルタはYキャパシタの電流・電圧レベルを低減可能
→アクティブ回路を汎用オペアンプ1つで実現可能



② 実験における雑音端子電圧の確認

- ・パッシブEMIフィルタ使用時と比較して、
ハイブリッドEMIフィルタ使用時は
150 kHzで5.15 dB, 200 kHz～1 MHzにかけて
10～15 dB程度の低減を確認
・コモンモードチョーク(CMC)の追加により、
さらにコモンモードノイズを低減

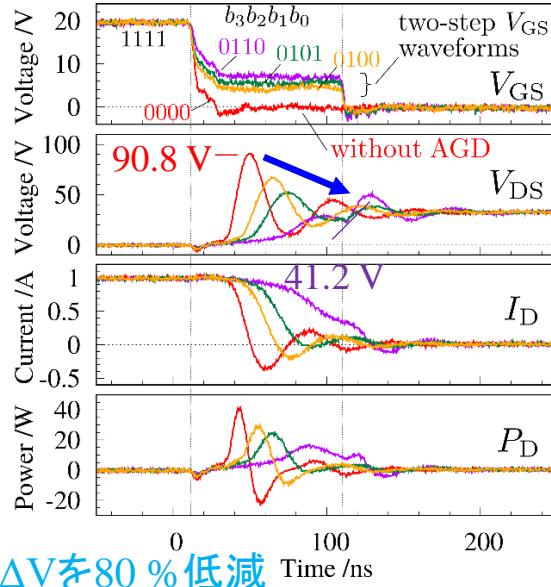
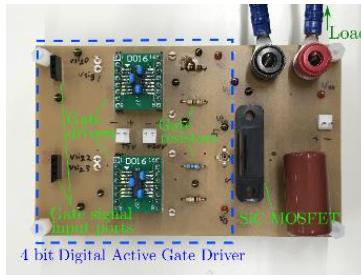


π型パッシブにアクティブ回路を追加によりノイズ低減効果向上を確認

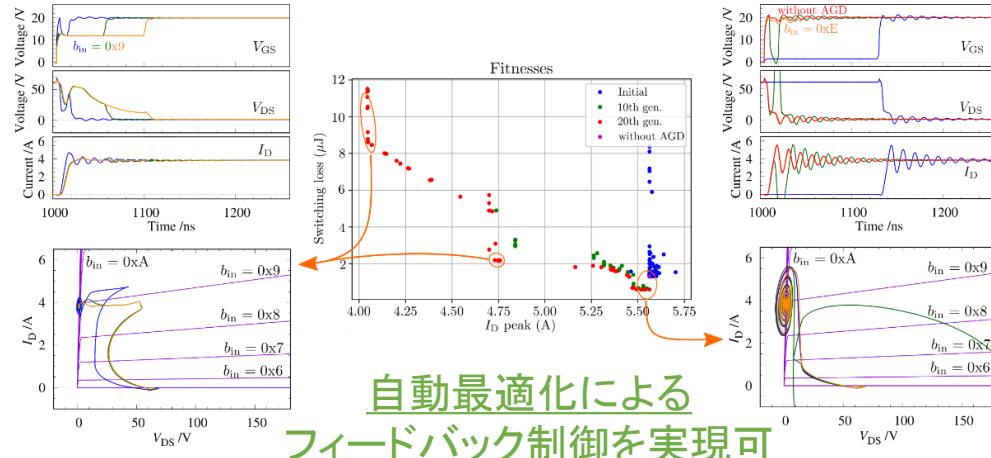
最終目標に対して得られた成果②

レイヤー3: アクティブゲートドライバの開発(九州大学, 京都大学)

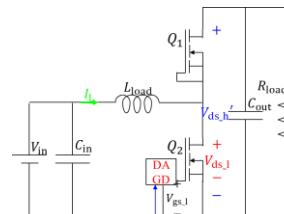
1. SiC MOSFETのSW動作改善



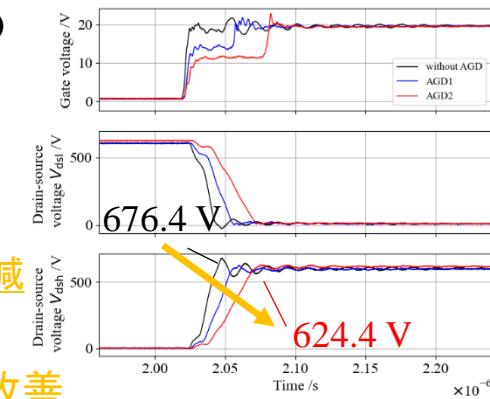
2. 遺伝的アルゴリズムによるスイッチング特性改善



3. 高電圧昇圧コンバータへの適用による動作特性改善



△Vを
60 % 低減



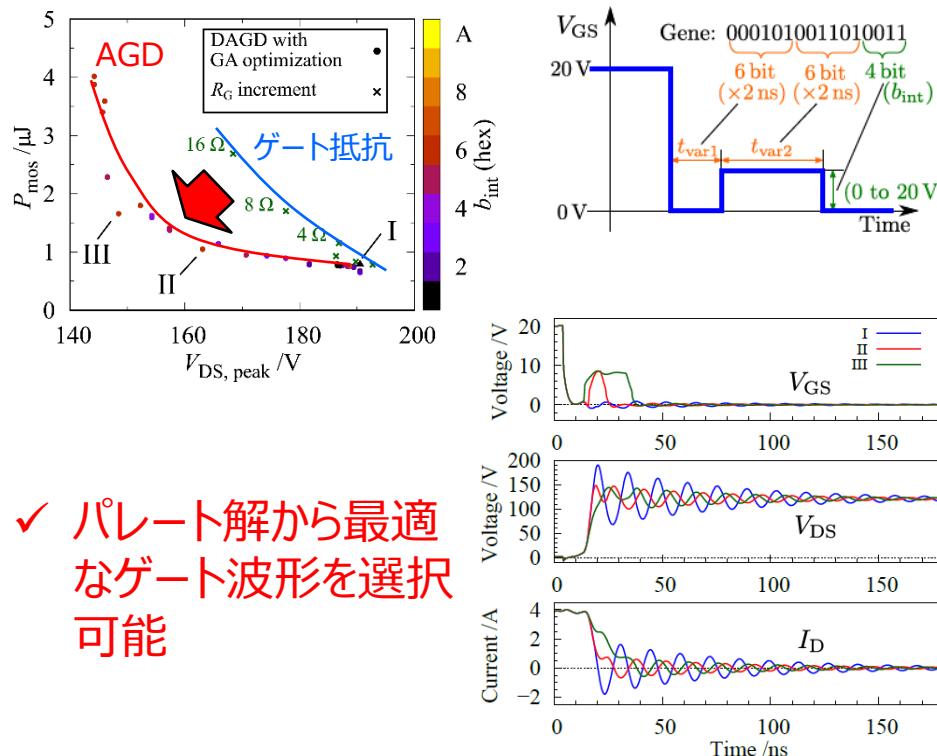
フルデジタル制御による動作改善

ゲート電圧の任意制御により電力変換回路の動作特性を改善

最終目標に対して得られた成果②

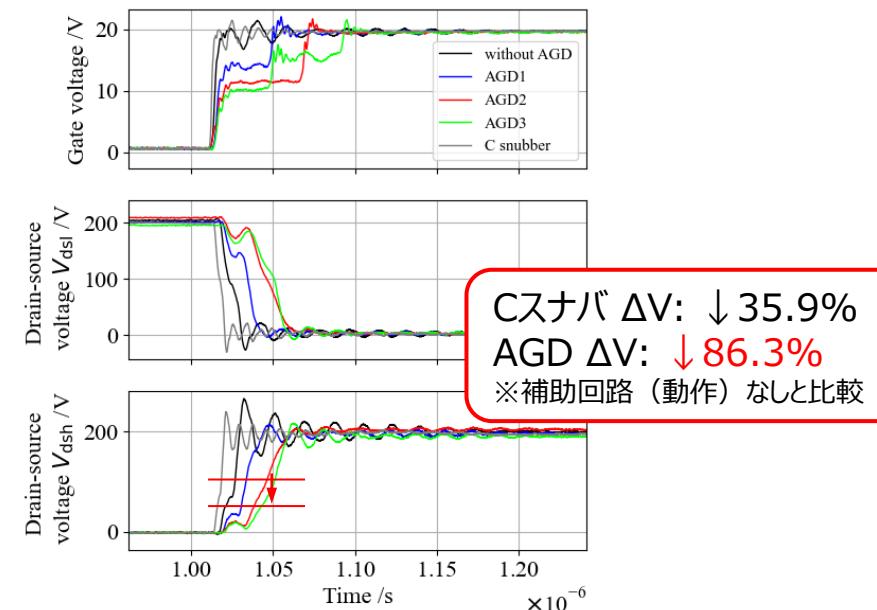
レイヤー3: アクティブゲートドライバの開発(九州大学, 京都大学)

成果1. 多目的最適手法に基づくゲート波形選択ツールの提案



✓ パレート解から最適なゲート波形を選択可能

成果2. 異なる駆動条件におけるコンバータ動作時のサージ電圧低減

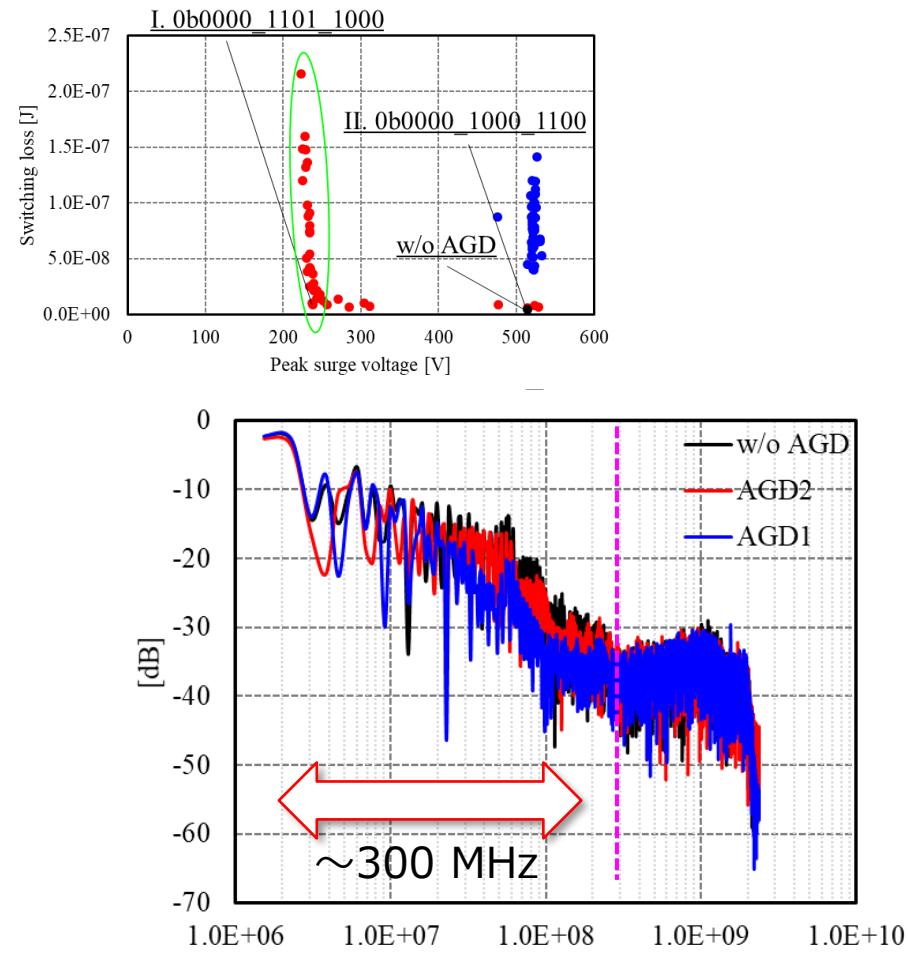
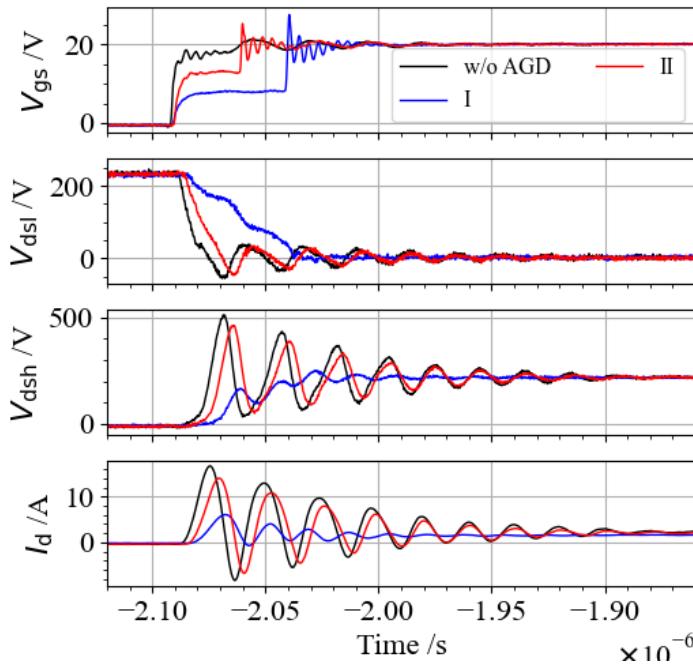


✓ Cスナバよりも高いサージ電圧抑制効果
✓ コンバータ駆動条件毎のゲート波形選択が必須

最終目標に対して得られた成果②

レイヤー3: アクティブゲートドライバの開発 (九州大学, 京都大学)

成果3. SiC MOSFETを用いた電力変換回路の高周波数動作

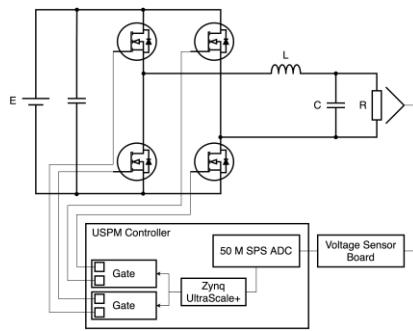


- ✓ 2MHzにおけるアクティブゲート駆動を達成
- ✓ アクティブゲート駆動によるスイッチングノードのスペクトルピークを低減

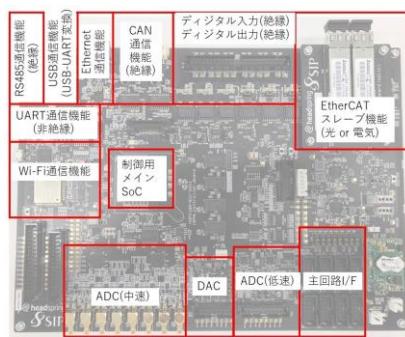
最終目標に対して得られた成果③

レイヤー4: デジタル制御コントローラ(ヘッドスプリング(株), 東京電機大学)

・单相PWMインバータ

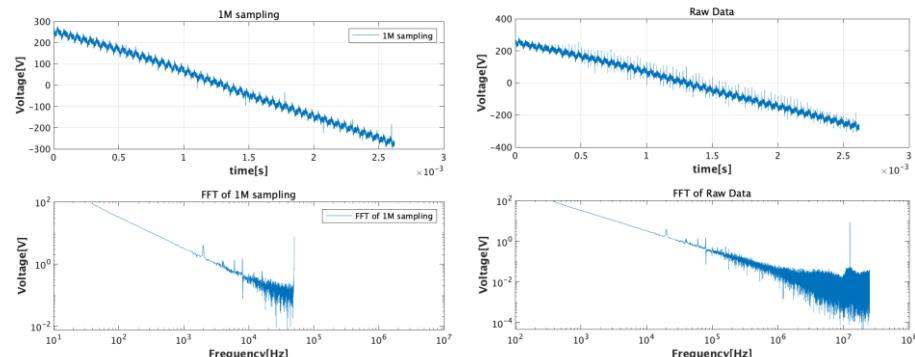


・USPMコントローラrev1



- ✓ 50 MHz ADCによる高速サンプリング
- ✓ FPGAによる高速移動平均フィルタ処理

・観測可能な周波数

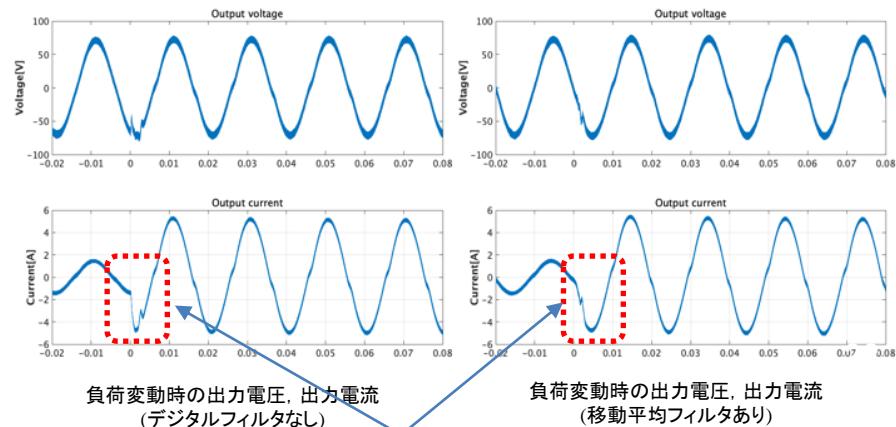


1 MHzサンプリング相当のデータと
その周波数解析

50 MHzサンプリングデータと
その周波数解析

✓ 観測可能な周波数帯域の拡大

・実験における負荷変動時の出力電圧, 出力電流



負荷変動時の出力電圧, 出力電流
(デジタルフィルタなし)

負荷変動時の出力電圧, 出力電流
(移動平均フィルタあり)

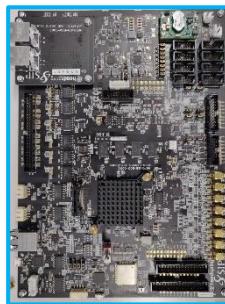
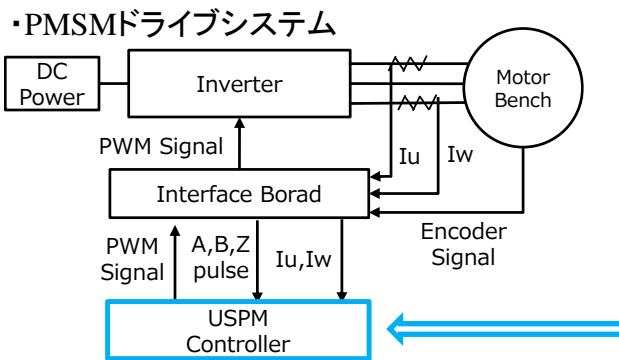
- ✓ 追從性能の向上を確認

单相PWMインバータを用いた

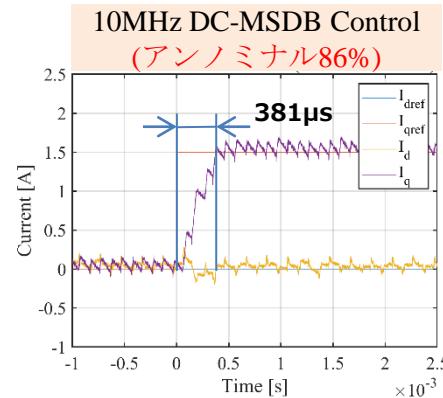
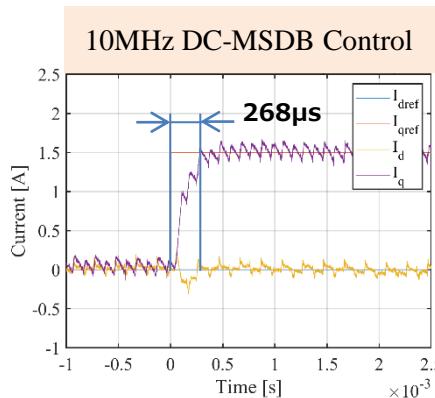
USPMコントローラrev1による開発プラットフォーム構築および電流制御(ACR)の実証を完了

最終目標に対して得られた成果③

レイヤー4:デジタル制御コントローラ (ヘッドスプリング(株), 東京電機大学)



- ・パラメータ変動に対する高いロバスト性



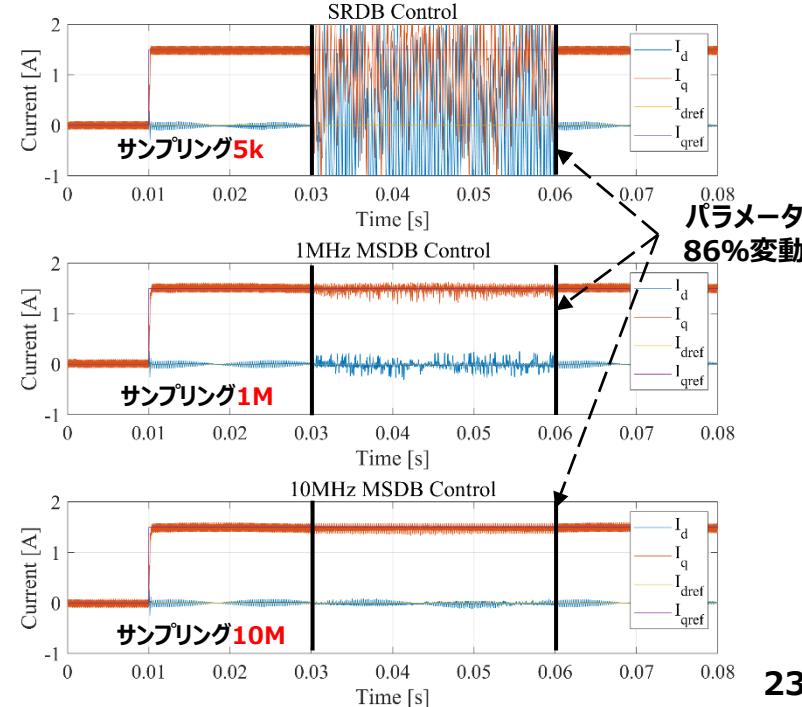
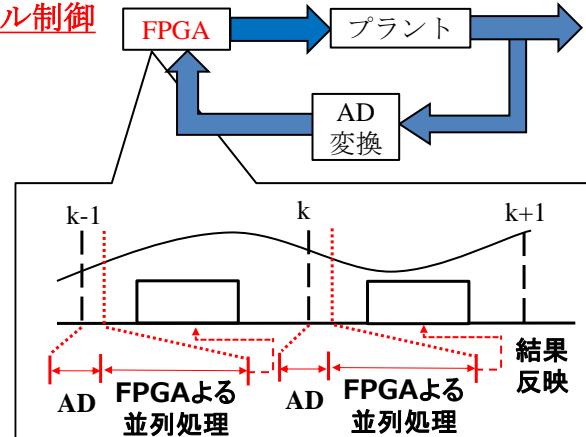
- ▶ 10MHz外乱補償型マルチサンプリングデッドビート(DC-MSDB)制御によりパラメータ変動に対して高いロバスト性を実現

USPMコントローラによる高いロバスト性を持つ PMSMドライブシステムを実現

- ✓ 50 MHz ADCによる高速サンプリングを実証
 - ✓ 従来に比べ非常に高速な瞬時デジタル制御系を構築

・制御タイミング

- ✓ FPGAによる並列処理
 - ✓ 瞬時制御が可能

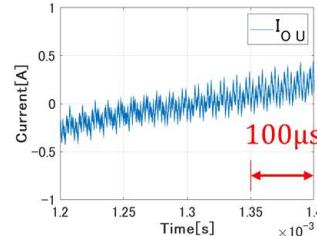


最終目標に対して得られた成果③

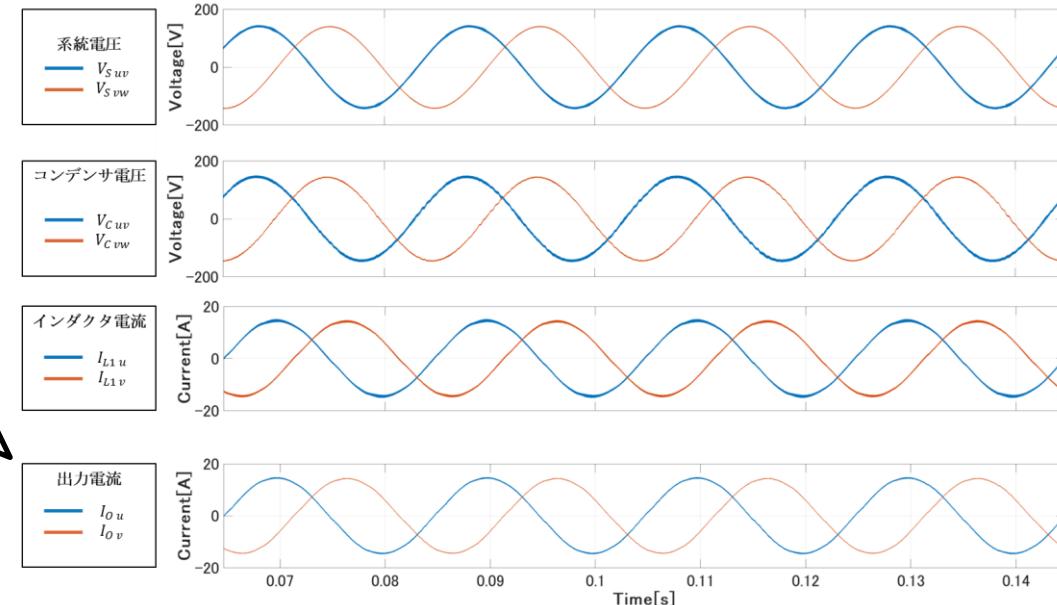
レイヤー4:デジタル制御コントローラ(ヘッドスプリング(株), 東京電機大学)

三相系統連系システムを対象とした50MHzADCによる高速フィードバックと
SoC-FPGAによる高速演算を制御適用した場合の応答の確認
(USPMコントローラrev1を使用)

①電流制御(ACR)を適用し、系統電力の位相に同期した定格相当の電流値が出力されていることを確認



②高速フィードバックと高速ディジタル演算を制御系適用し、十分な速応性や追従性があることを確認



最終目標に対して得られた成果③

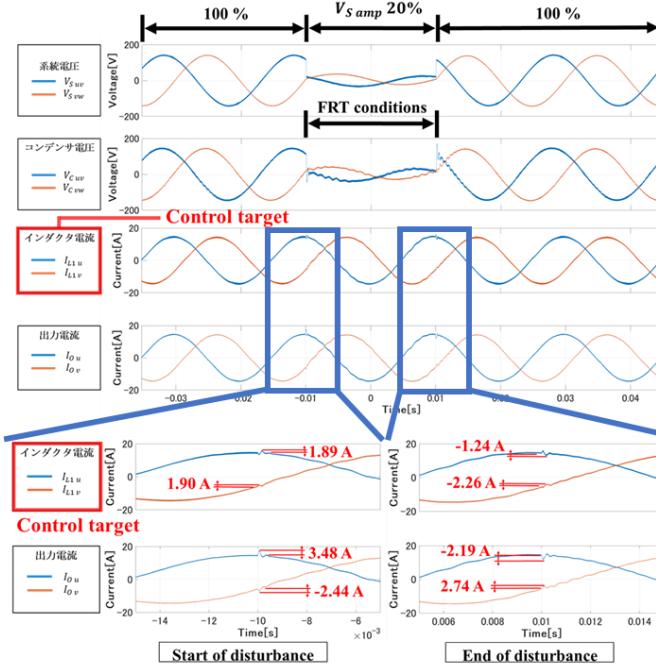
レイヤー4: デジタル制御コントローラ (ヘッドスプリング(株), 東京電機大学)

○三相系統連系システムを対象とした実機検証

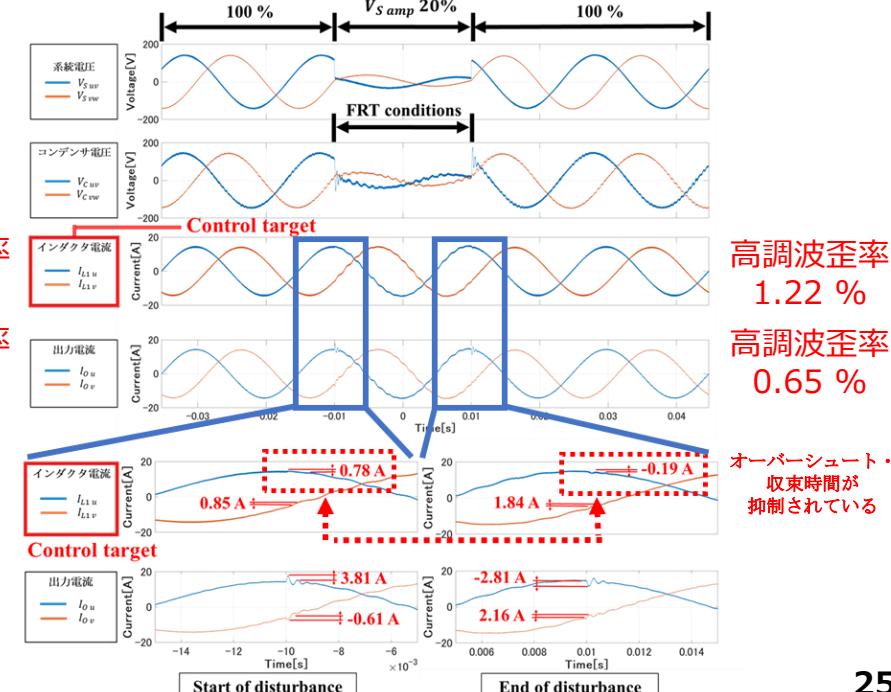
12.5MHz毎のADCの結果を反映させたマルチサンプリングPI制御系、外乱補償型マルチサンプリングデッドビート制御系(MSSRDBDC)を構築

○USPMコントローラは、系統事故発生条件においても高い制御性能を示しており、
即応性・追従性に優れた様々な制御アプリケーションを動作させることが可能

○12.5MHz PI制御系



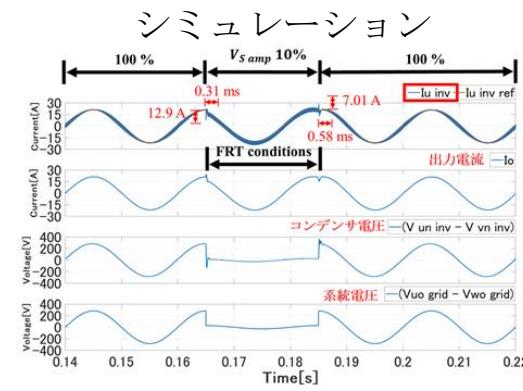
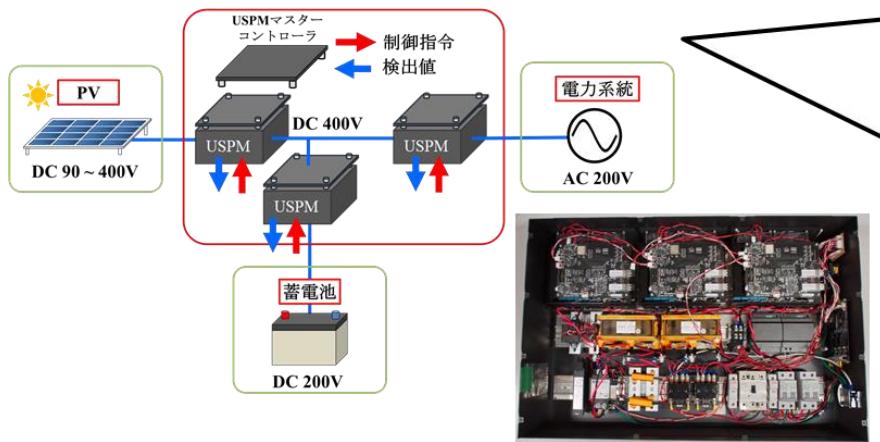
○12.5MHz MSSRDBDC



最終目標に対して得られた成果③

レイヤー4: デジタル制御コントローラ (ヘッドスプリング(株), 東京電機大学)

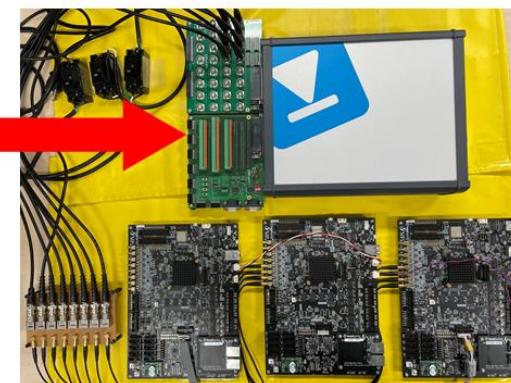
PV用系統連系システムの構築



○USPMモジュールが系統事故発生においても高い制御性能を持つことを確認

HIL (Hardware-in-the-loop)による
システム開発環境を構築
リアルタイムシミュレータで
PVシステムの回路を模擬

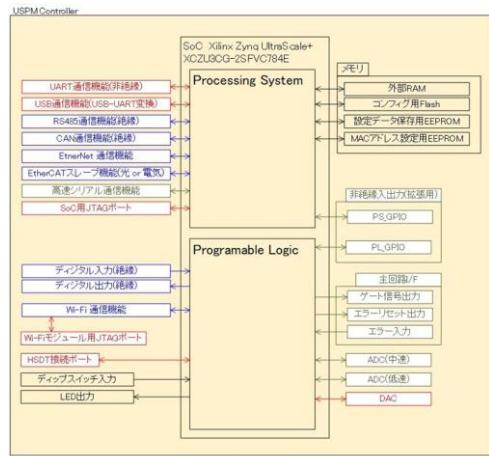
- 通信ソフトウェアの開発
- パワエレ制御ソフトの開発
- シーケンス制御ソフトの開発
を高効率化



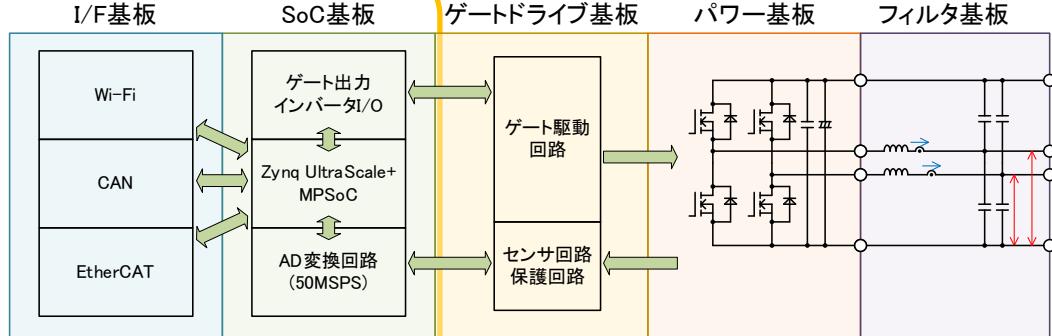
最終目標に対して得られた成果③

レイヤー4:デジタル制御コントローラ(ヘッドスプリング(株), 東京電機大学)

USPMコントローラrev1



USPMコントローラrev2

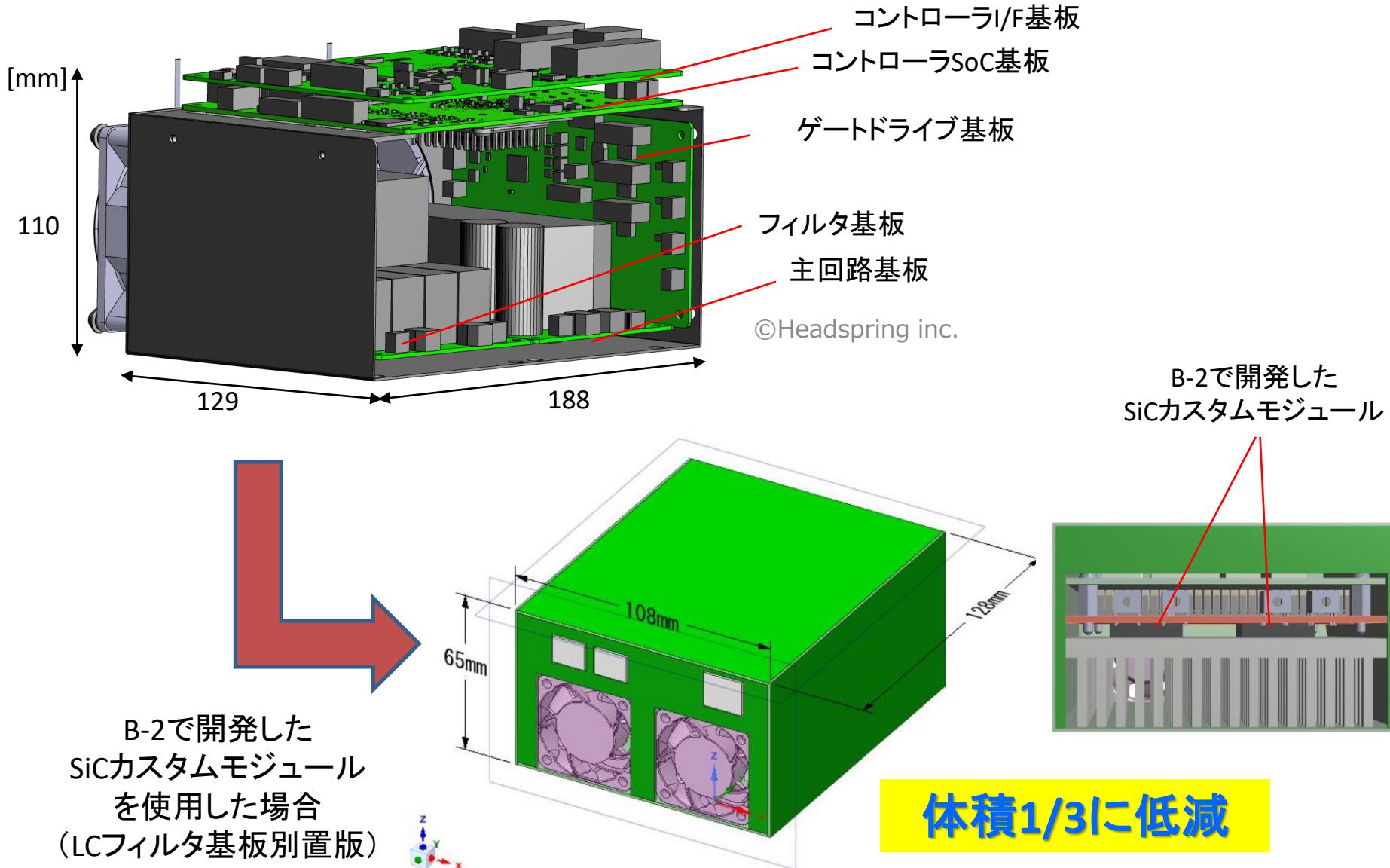


小型化(50%)



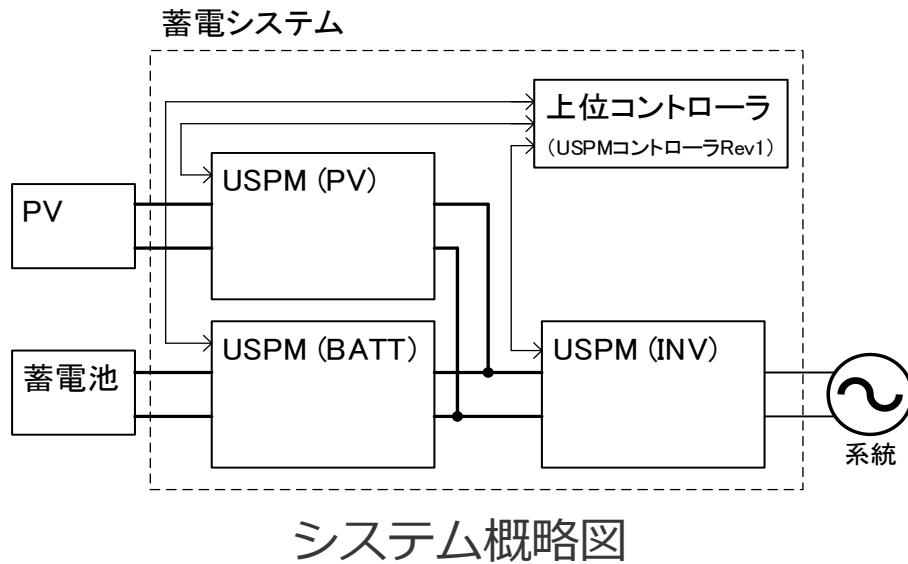
USPMコントローラrev1、USPMコントローラrev2、USPM試作機を製作

最終目標に対して得られた成果③



最終目標に対して得られた成果③

レイヤー4:デジタル制御コントローラ(ヘッドスプリング(株), 東京電機大学)

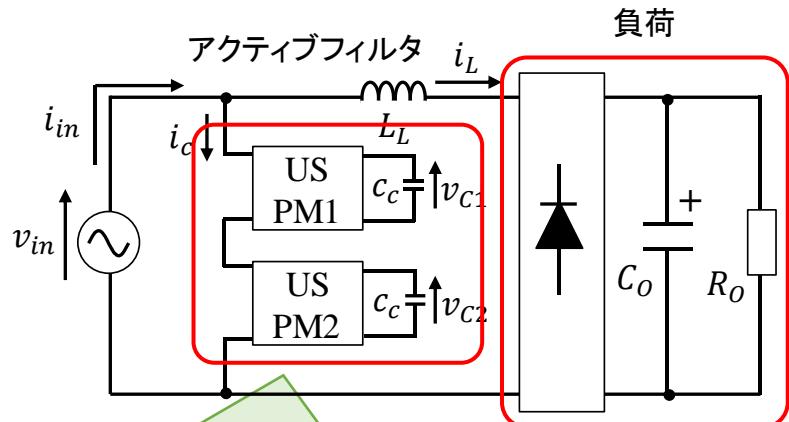


USPMハードウェアを適用した蓄電システムを製作

最終目標に対して得られた成果④

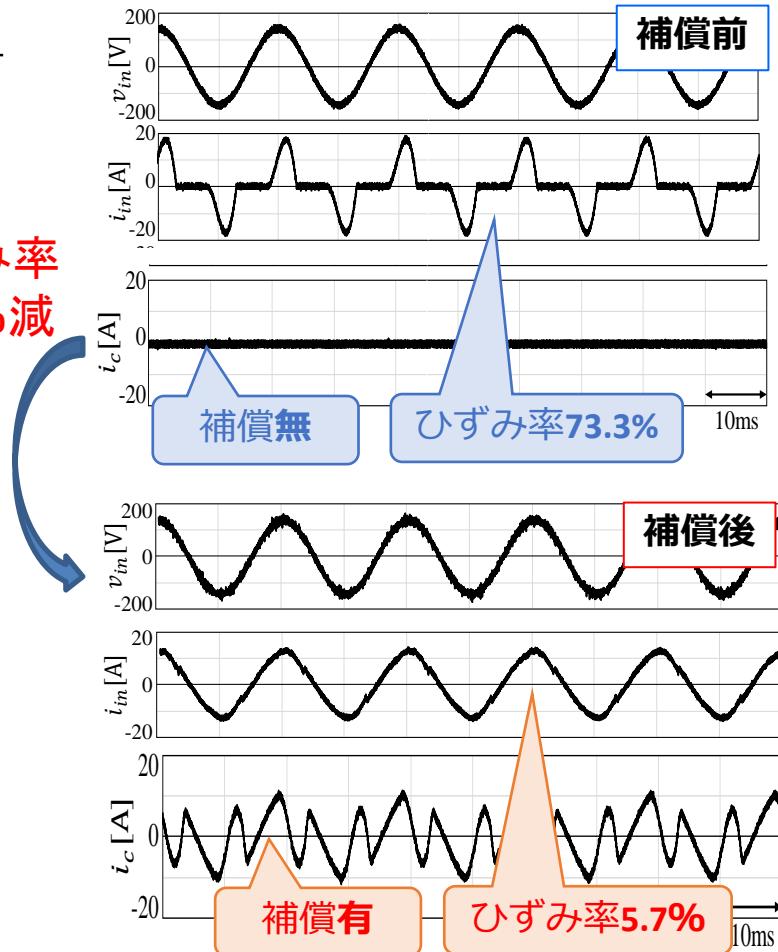
レイヤー5:システム応用開発(長岡技術科学大学, 北海道大学, 日立Astemo(株))

①応用技術1: 単相アクティブラフィルタへの応用



ひずみ率
67.6%減

※プロトタイプのUSPMにより実験を実施
(USPMの特徴である独立したコントローラ構成
やコントローラ間の無線通信は模擬的に実装)

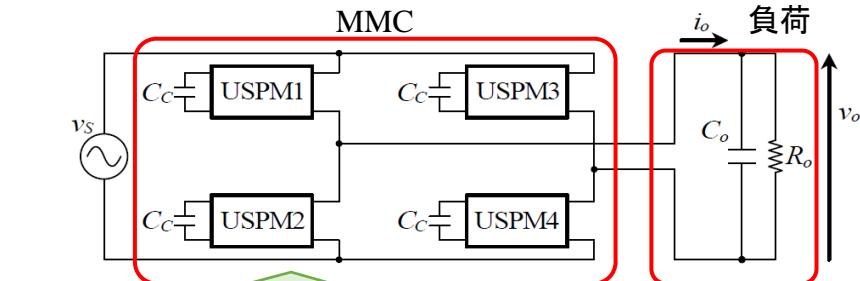


非線形負荷により生じる高調波電流の補償により入力電流THD6%以下, 力率1制御
USPMに基づくアクティブラフィルタ(1kVA)を開発, 実験で有効性を確認

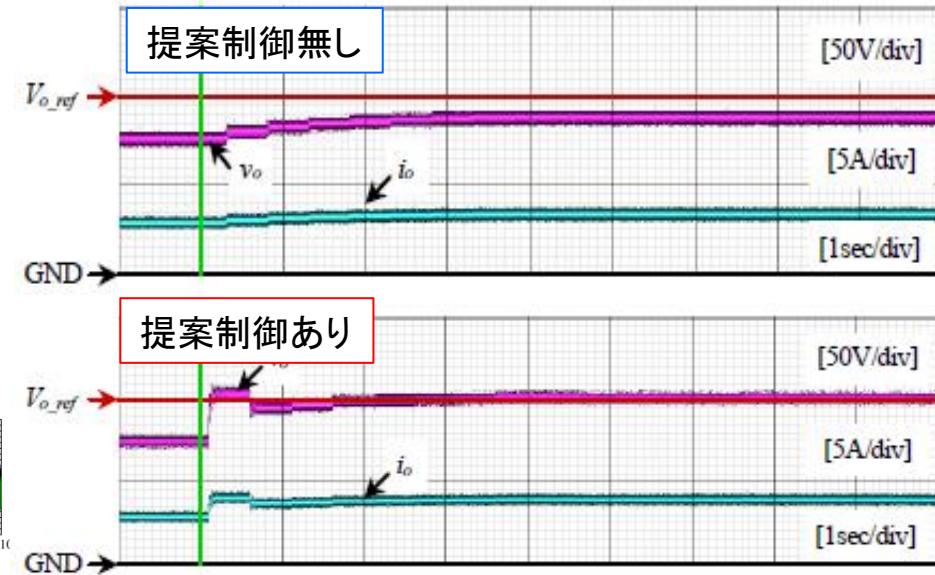
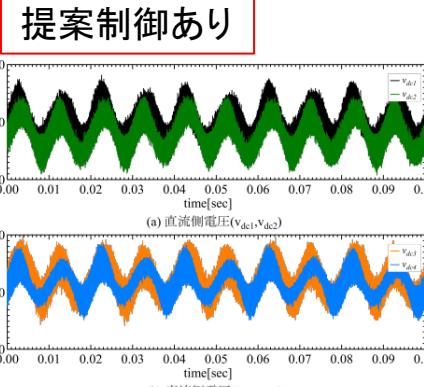
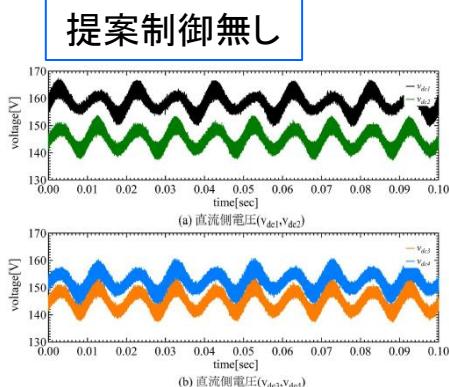
最終目標に対して得られた成果④

レイヤー5:システム応用開発(長岡技術科学大学, 北海道大学, 日立Astemo(株))

②応用技術2: 単相MMC(Modular Multilevel Converter)への応用



※プロトタイプのUSPMにより実験を実施



・出力電圧制御における偏差抑制制御
出力電圧の定常偏差従来比1/10

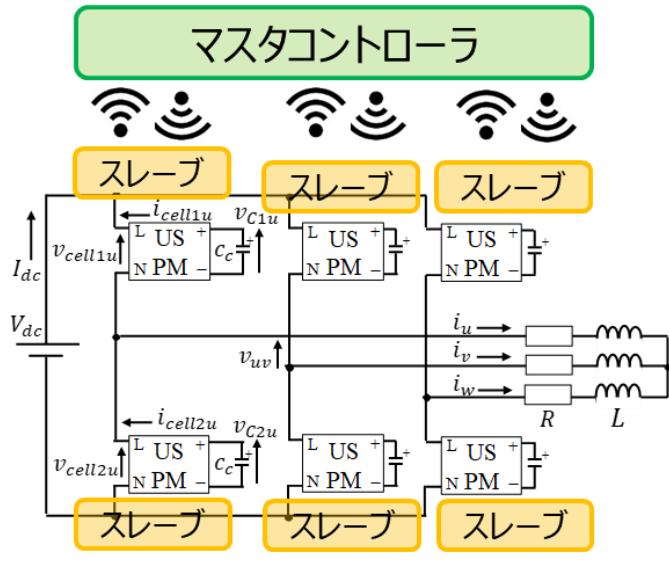
・各USPMの自立分散電圧バランス制御
出力電圧の定常偏差従来比1/10

プロトタイプのUSPMを4セル用いた
MMC(3kVA)を開発(三相への拡張も可)

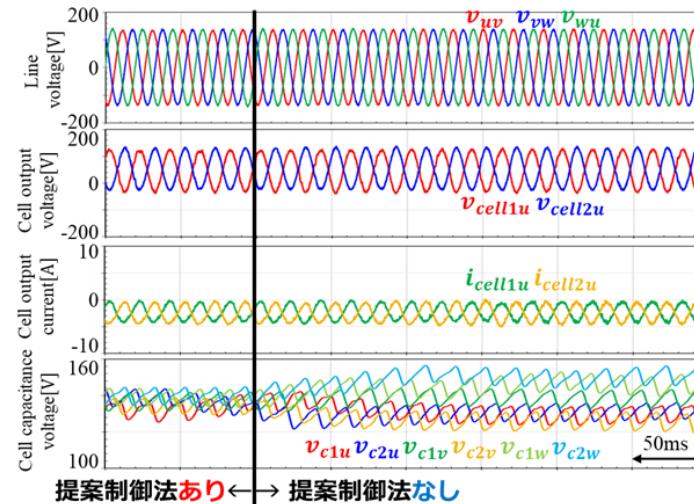
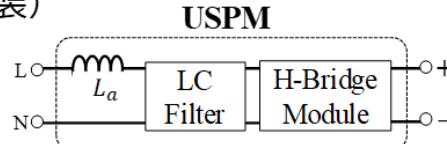
実験、およびシミュレーションにより、入力電流歪率5%以内、
出力電圧の一定制御の基本的な動作検証完了

最終目標に対して得られた成果④

③応用技術3: 無線通信利用を見据えた三相MMCへの応用

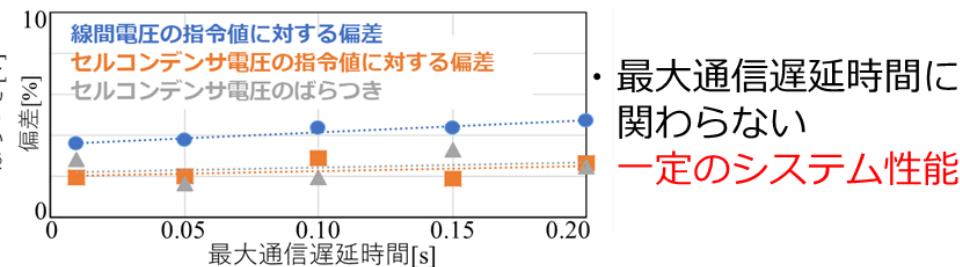


※プロトタイプのUSPMにより実験を実施
(USPMの特徴である独立したコントローラ構成やコントローラ間の無線通信は模擬的に実装)



セルコンデンサ電圧に応じた自律的な指令値可変手法

- ・セルコンデンサ電圧のバランス ばらつき80%抑制
- ・無線通信による遅延と遅延ばらつきの影響を受けない安定動作 線間電圧THD 0.65%抑制



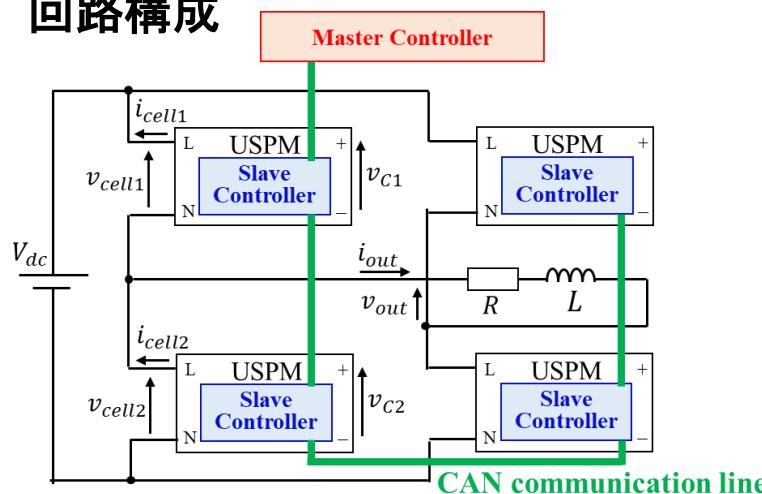
- ・最大通信遅延時間に 関わらない
一定のシステム性能

自端情報に基づいたマスタスレーブ間の
無線通信の影響抑制手法の有効性を実験により確認

最終目標に対して得られた成果④

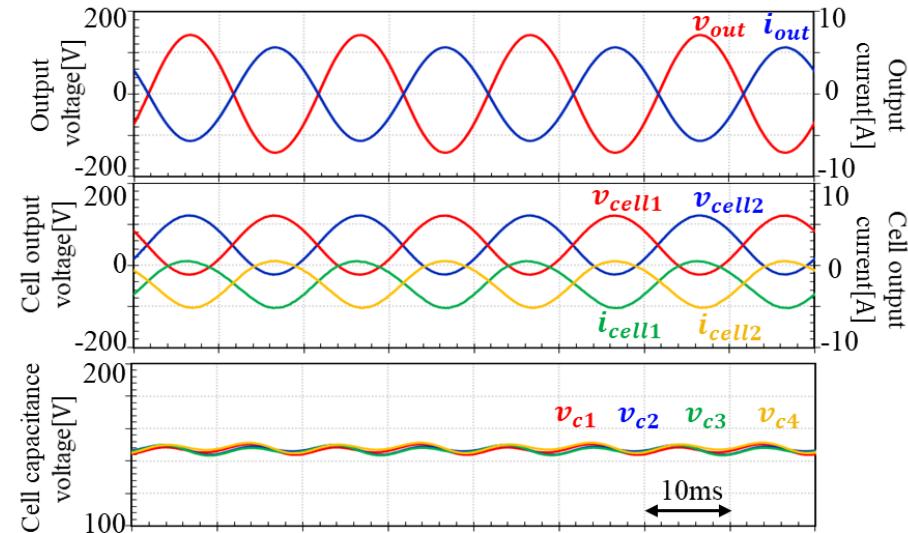
USPM試作機を使ったMMC構成における提案法適用時の実機検証

● 回路構成

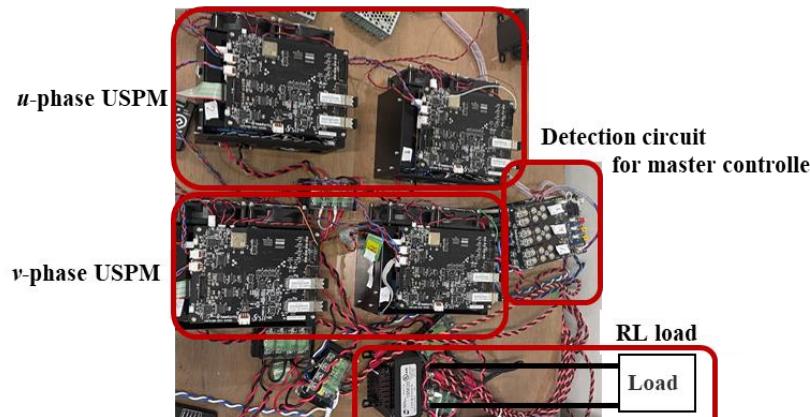


CANによるコントローラ間通信の実装

● 定常時における実験結果



● USPMにより構成した単相MMC



配線の簡素化

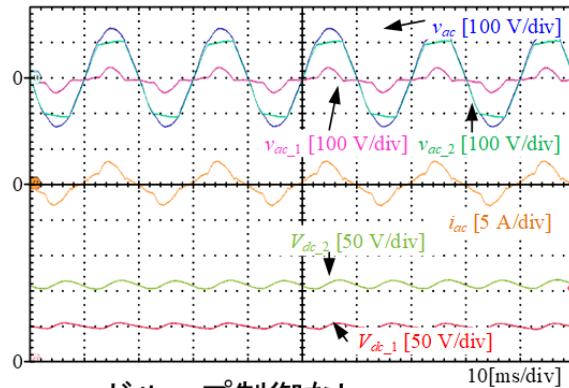
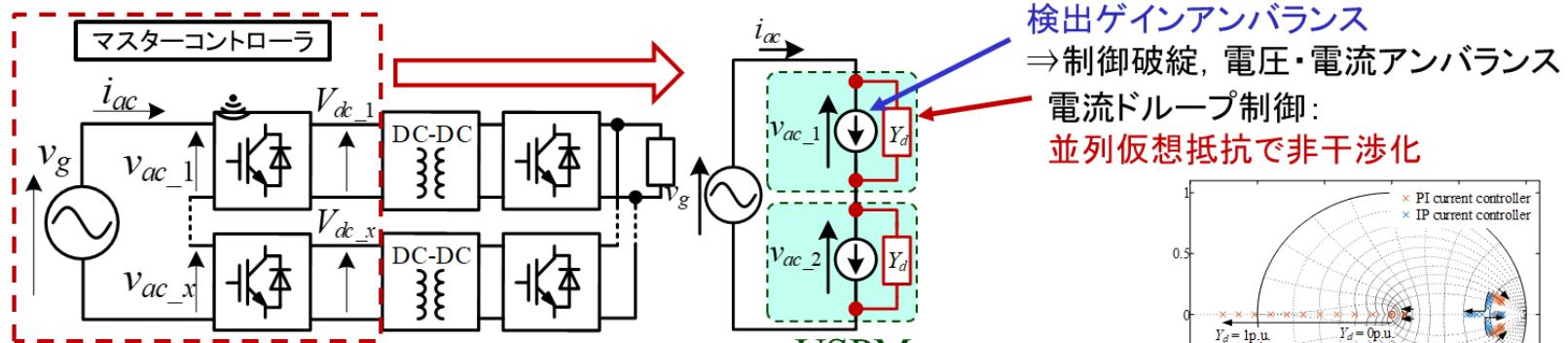
- ・出力電圧指令値 $100V_{rms}$ に
対して実測値 $100.9V_{rms}$
→ **指令値偏差0.9%**
- ・出力電圧 THD1%以下

独立したコントローラ構成かつ
コントローラ間の通信を実装した場合にも
提案法が有効

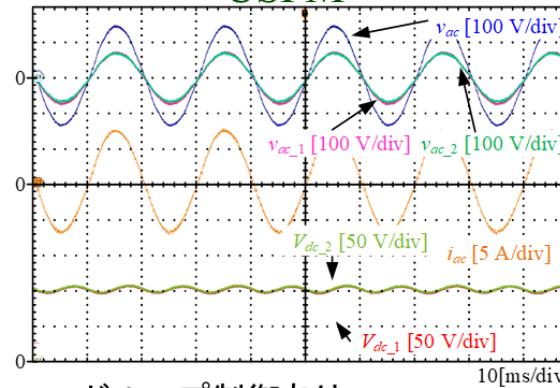
最終目標に対して得られた成果④

レイヤー5:システム応用開発(長岡技術科学大学, 北海道大学, 日立Astemo(株))

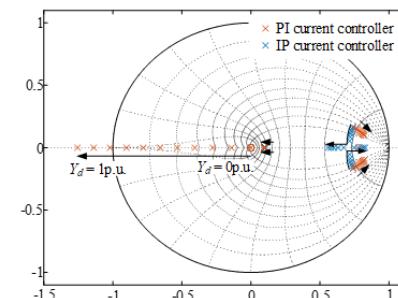
③応用技術3:ユニバーサルマトリックスコンバータの開発



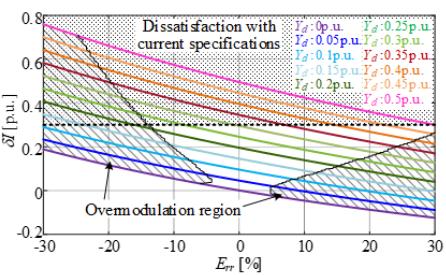
ドループ制御なし:
波形ひずみ大, 動作不安定



ドループ制御あり:
入力電流正弦波, 動作安定化



安定解析

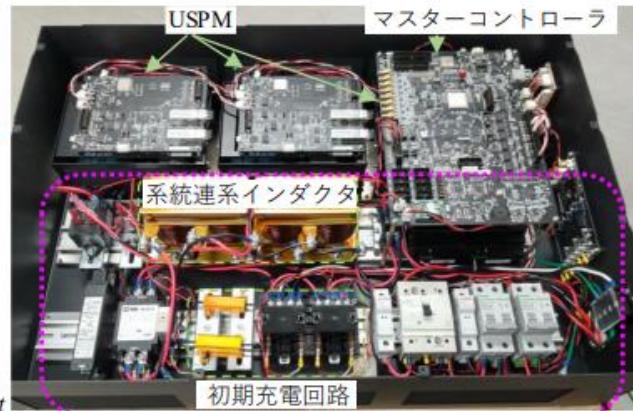
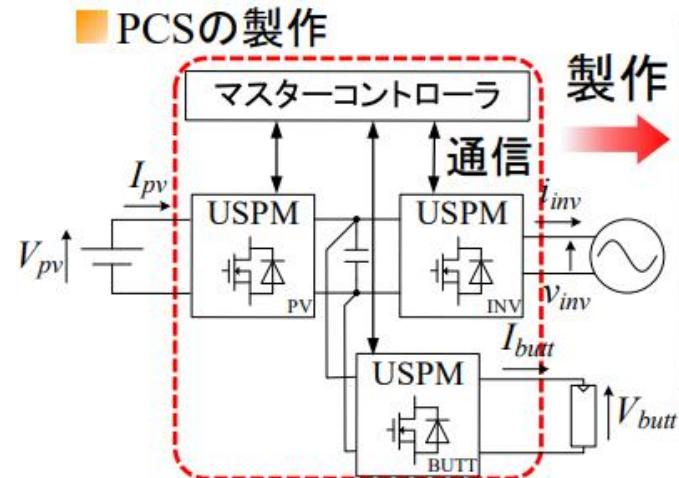


パラメータ設計法

直列接続構成時の動作を安定化する
ドループ制御の安定解析, パラメータ設計法の検討完了 (3相への応用も可)

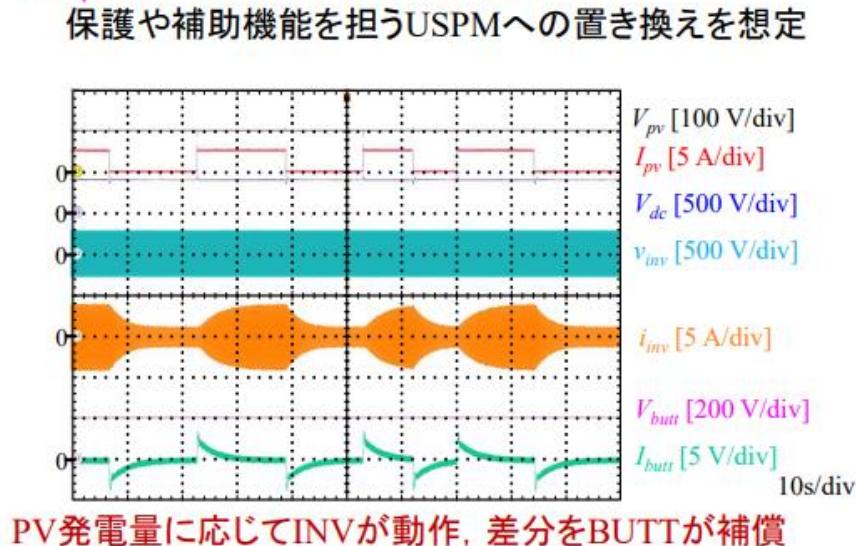
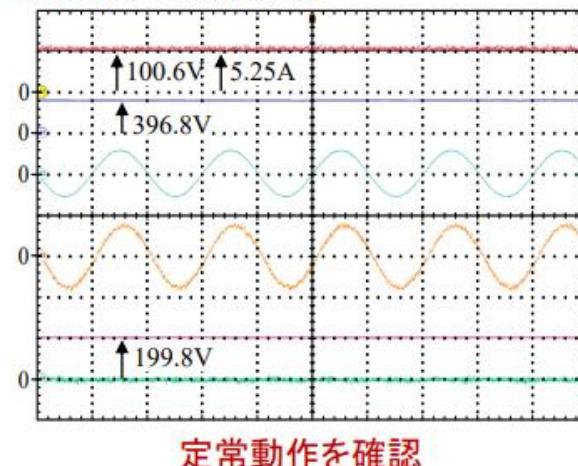
最終目標に対して得られた成果④

レイヤー5:システム応用開発(長岡技術科学大学, 北海道大学, 日立Astemo(株))



USPM内部で
熱, ノイズ対策済
⇒最短配線不要

PCSの実験結果



最終目標に対して得られた成果④

レイヤー5:システム応用開発(長岡技術科学大学, 北海道大学, 日立Astemo(株))

⑤応用技術5:USPMの自動車向け応用技術の開発

■ USPMの自動車応用の効果

- ✓ 自動車の電動化へのシフトに対し、既存の自動車メーカーが大量生産する自動車だけではなく、多種多様な用途の自動車の電動化も必要であり、少量多品種への対応が求められる。
- ✓ それらを実現するためには、電動車両メーカーのすそ野を広げることが必須であり、その実現のために電動車両開発を容易にするUSPMは非常に大きな役割を果たすと考えられる。

■ USPM車載応用の具体例

- ✓ 応用に適した車載電力変換機器

**電動車両に必須のモータインバータ
補機用DCDCコンバータ
オンボードチャージャー**

- ✓ USPMの並列化

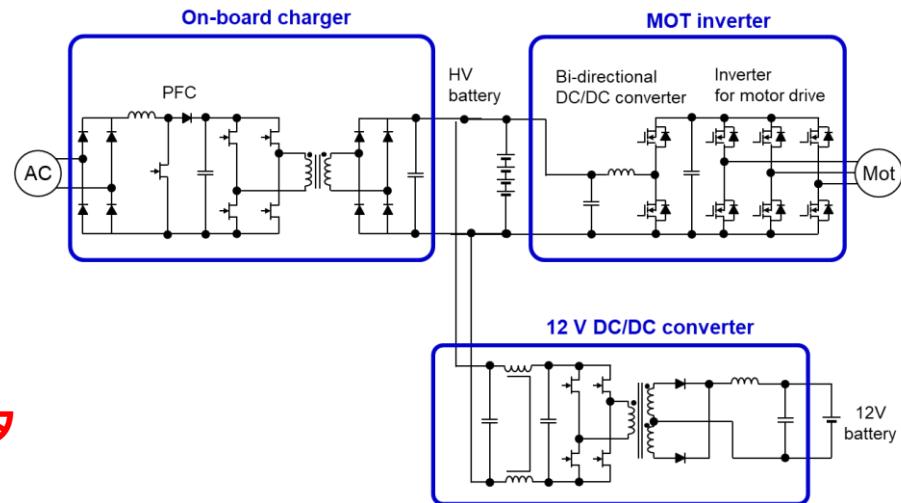
上記機器のUSPMを**並列化**することで、多様な出力の車両に適用ができる。

- ✓ 要素技術の適用

電動車両の低損失化、低ノイズ化は電動車両にとっても重要課題であり

アクティブゲートドライブ、ノイズフリーEMCフィルタは要素技術単独で車載効果が期待できる。

電動車の代表的電力変換機器構成



最終目標に対して得られた成果④

■ USPMの電気自動車への適用検討

- ✓ 多種多様な電気自動車の普及拡大に伴い、モータ駆動システムの電圧と出力の範囲も拡大している。
- ✓ USPMを適用する場合には、システム電圧毎（100V, 400V, 800Vなど）にUSPMを用意し、USPMを並列化することで広範な電圧-出力帯をカバーすることが適切と考える。

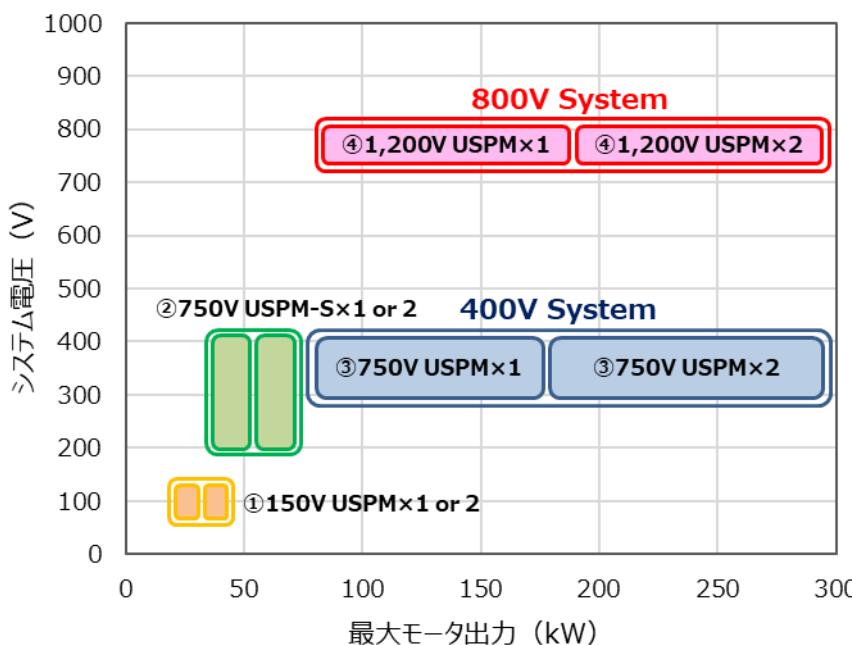


図1. 電気自動車のシステム電圧とモータ出力範囲、及びUSPMの仕様例

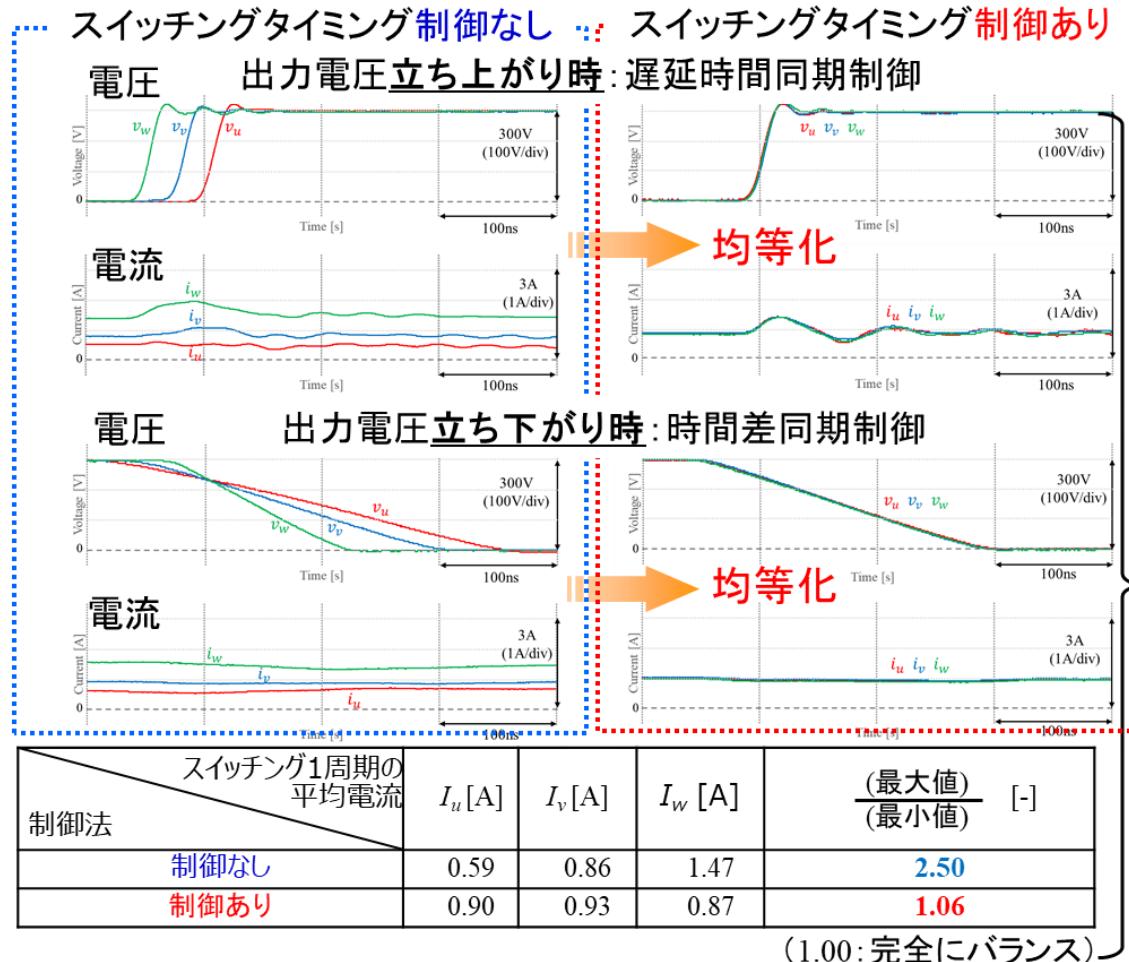
■ 要素技術成果の適用効果

- ① ノイズフリーEMCフィルター
電気自動車向けインバータにはEMCフィルターは必須の部品であり、ノイズフリーEMCフィルター技術の適用により、ノイズ低減、EMCフィルターの小型化が期待できる。
- ② アクティブ・ゲート・ドライバ
アクティブ・ゲート・ドライバ技術により、パワーデバイスの高速スイッチング時に発生するサージ電圧を抑制できるため、損失低減による電気自動車の走行距離の向上やノイズ低減に寄与できる。
- ③ 瞬時デジタル駆動制御
50MHzレベルの極めて高速なフィードバック制御を電気自動車の駆動用モータ制御に適用することで、トルク急変時の電流のオーバーシュート・アンダーシュートの抑制や故障時にインバータを瞬時に停止することなどが可能となる。
- ④ USPMのスイッチングタイミングを制御する並列化技術
本技術によりインバタ回路構成のUSPMを容易に並列化できるため、出力範囲の異なる電気自動車へのUSPMの適用が可能となる。

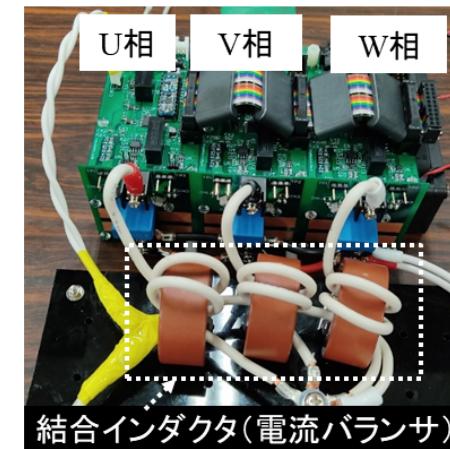
最終目標に対して得られた成果④

レイヤー5:システム応用開発(長岡技術科学大学, 北海道大学, 日立Astemo(株))

④応用技術4:並列に接続された回路のスイッチングタイミング同期制御



実験回路



コントローラ間の双方向通信が無しに、出力電圧の立ち上がり/立ち下がりのどちらにおいても、並列接続時の電流の均等化を達成
→電流バランサの小型化

また、クロック周波数を300 MHzから800 MHzに上げて
制御分解能を3.3 nsから1.25 nsにすることで、より高精度な制御を確認することを確認

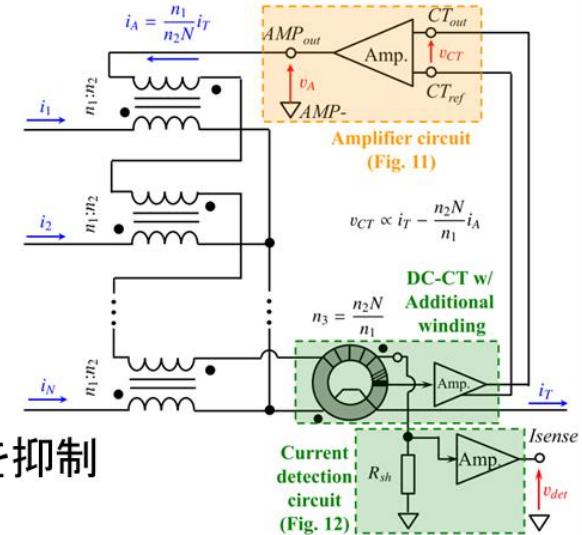
最終目標に対して得られた成果④

レイヤー5 USPMのマスターントローラとシステム応用技術開発（北海道大学）

モジュール並列変換器の横流抑制を目的とし小型化と電流検出が可能な結合インダクタ回路

①提案する結合インダクタ回路

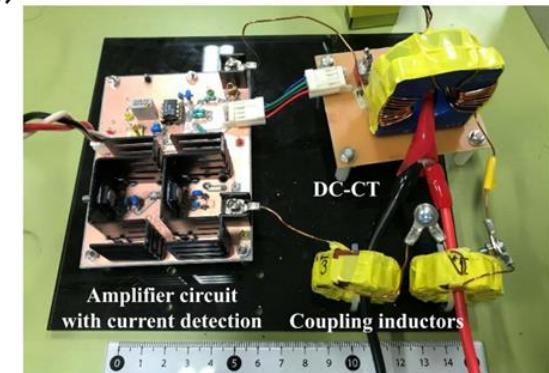
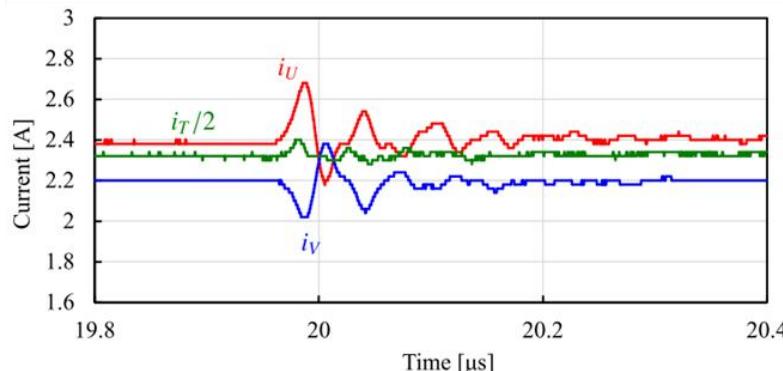
- ・横流成分に対してのみ磁束を作るインダクタとして動作
→コアが小型
- ・モジュール化に優れている
- ・直流電流が流れるアプリケーションにも適用可能で、
電流検出機能付き



②提案回路を二並列チョッパ回路で実機検証

- ・バランス電流により磁束がキャンセルされ、正常に横流を抑制
→電流の増加は最大でも0.3 A程度
(同じコアの場合、従来法ではコアが飽和して使用不能)

スイッチング時
の拡大波形



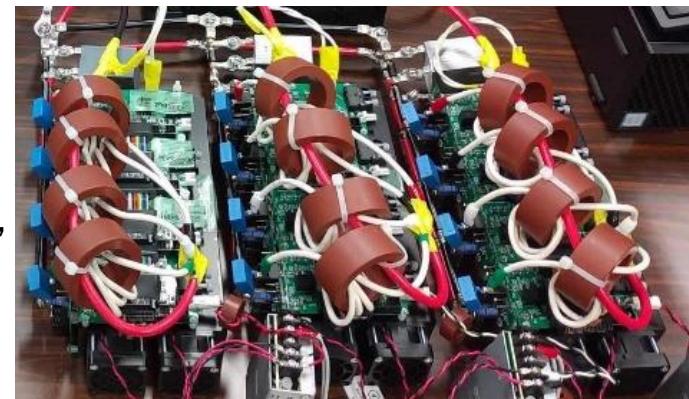
最終目標に対して得られた成果④

レイヤー5 USPMのマスターントローラとシステム応用技術開発（北海道大学）

開発したハーフブリッジモジュールを用いて迅速に実験が可能になった例

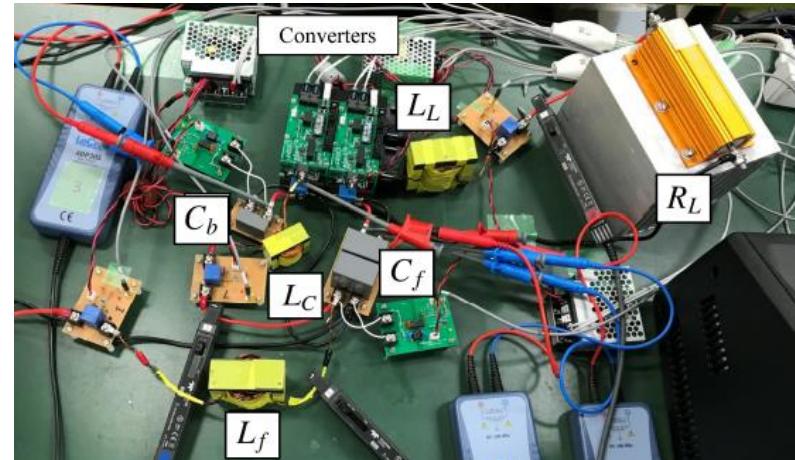
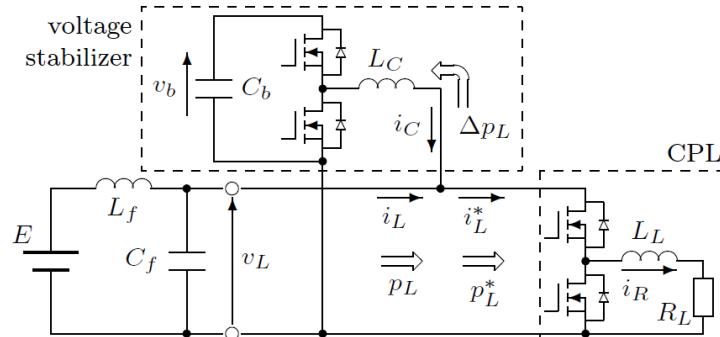
①30 kW三相デュアルアクティブブリッジコンバータ

- ・1相当たり4個のハーフブリッジモジュールを並列
→合計24個のハーフブリッジモジュールを使用
- ・既に確立したスイッチングタイミング制御と組み合わせて、
容易に大容量の実験を実現



②直流配電システムの電圧安定化装置

- ・定電力負荷の不安定現象を抑制



社会実装の実現可能性

見直し工程に対し予定通り進捗

研究開発項目	2018年度計画	2019年度計画	2020年度計画	2021年度計画	2022年度計画	出口戦略	製品化
B-① エネルギーデバイスへの応用を見据えたIoE共通基盤技術	USPM全体設計 TRL3 デジタル制御回路の開発・要素技術 目処付	パワーモジュール高パワー密度実装技術、高温動作対応技術の開発 TRL4	コア・パワーモジュール設計・開発・評価・実証 TRL6	USPMの統合設計、試作、評価(ユニバーサル性確認)・インバータ評価・実証 TRL4 反映	USPMの統合設計、試作、評価(ユニバーサル性確認)・インバータ評価・実証 TRL6 反映	デバイスはベンチャーであるFlosiaで製造・販売検討 太陽光PCSなどの変換器はベンチャーのヘッドスプリングで製品化検討 USPMのモジュールは富士電機で製品化検討	・ 1200V/10A Ga2O3MOSFET ・ 1200V、200°C 対応USPM ・ USPM適用 太陽光PCS
B-② WPTシステムへの応用を見据えたIoE共通基盤技術	高速スイッチプロセス開発/試作 TRL4 13.56MHz同期整流/ゲート駆動回路技術 TRL4	大電流スイッチ開発 大容量化技術 高周波素子開発/試作 受信アンテナ・回路/送電回路設計試作 マイクロ波電力伝送システム機能検証 TRL4	スイッチ高性能化 MHz帯ワイヤレス電力伝送実証 高周波素子高性能化 大電力受電/送電システム開発 マイクロ波電力伝送実証 TRL6 反映 反映 TRL6	スイッチ高性能化 MHz帯ワイヤレス電力伝送実証 高周波素子高性能化 大電力受電/送電システム開発 マイクロ波電力伝送実証 TRL5 反映 反映 TRL6	スイッチ高性能化 MHz帯ワイヤレス電力伝送実証 高周波素子高性能化 大電力受電/送電システム開発 マイクロ波電力伝送実証 TRL6	デバイス製造の大発ベンチャーの設立を検討 非放射型WPTシステム用モジュールとして製品化を検討	・ 13.56MHz帯用高速大容量新構造GaNデバイス ・ 高速スイッチングパワエリシステム用ゲート駆動IC ・ 非放射型高速WPTシステム

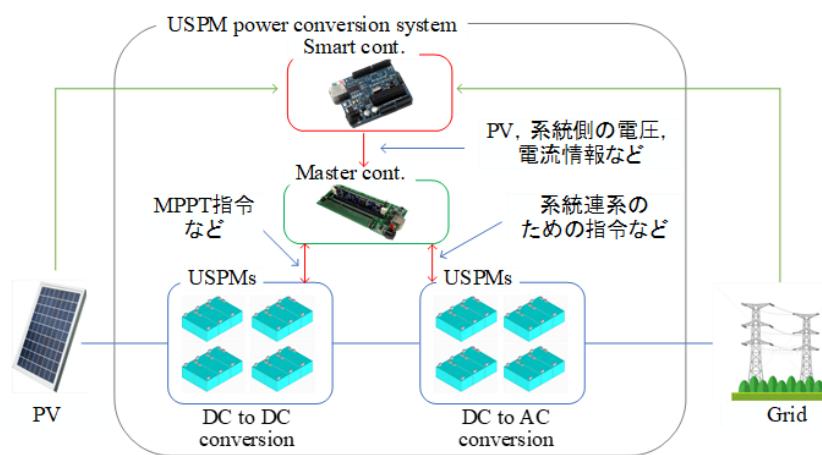
(1)2025年までの出口戦略と達成見込み

本研究開発によって得られたUSPMの要素技術、設計技術等はヘッドスプリング、富士電機で製品化に向けさらに開発を進める。そして各種規格に適合させ、蓄電装置やPCSに適用可能なUSPMの製品化を検討する。

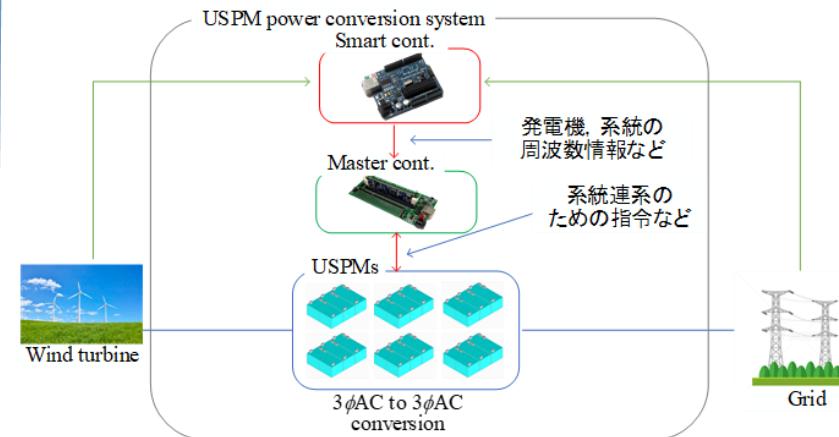
(2) 今年度末での社会実装達成見込み: 100%

理由: 2022年度までにUSPMの構成や特徴を明確化し、社会実装に向けた評価方法の具体化を実施した。また個別テーマごとの開発目標も概ね達成見込みである。来期以降も今期同様の規模で研究開発を進めることで中間、最終目標に到達でき、製品化に繋げられる見込みである。

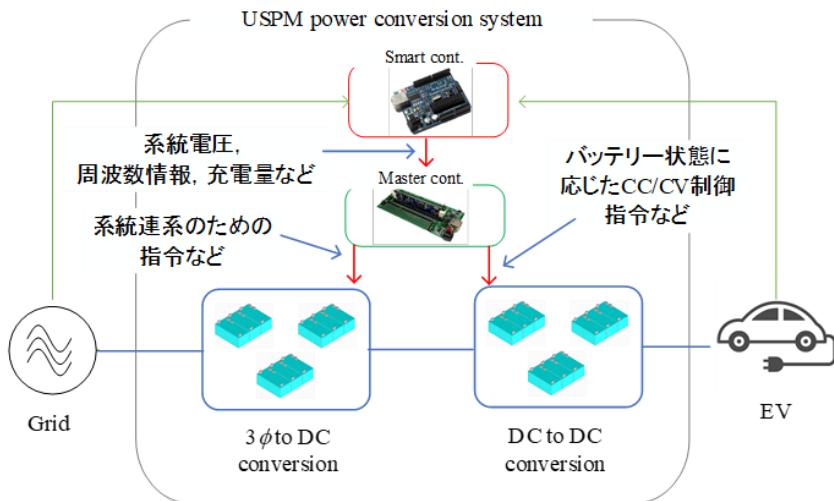
社会実装の実現可能性



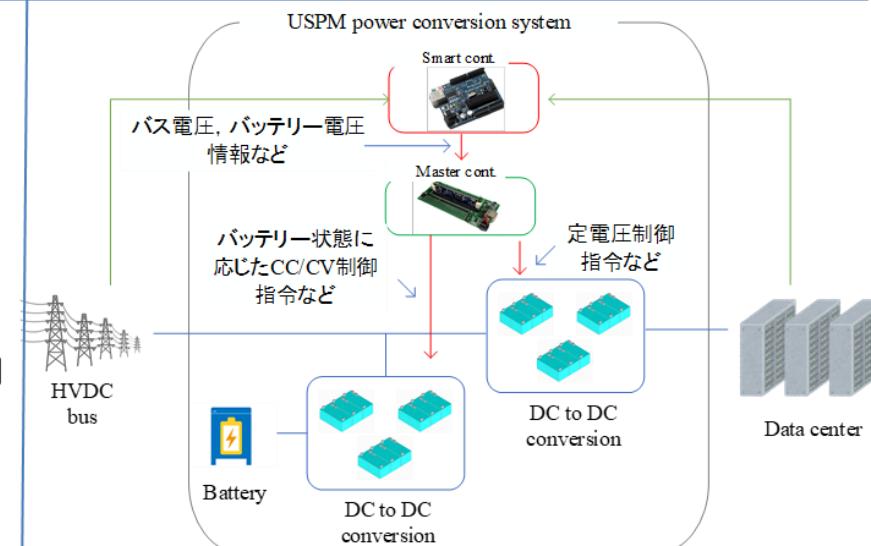
太陽光発電への応用



風力発電への応用



EV用充電器への応用



直流給電システムへの応用

USPM:様々なアプリケーションに対応可能

・研究開発成果に基づき,産学官で連携し,技術規格の策定や国際標準化に向けた取組を実施する。電力変換器のモジュール化の研究開発は諸外国でも活発に進められており,今後,技術確立に向け,研究開発が加速することが予想される。

本研究の提案では,諸外国のような主回路モジュールだけでなく,ゲートドライバを含んだ超高速デジタルハードウェア技術と制御技術など,我が国における要素技術の優位性を活かした世界最高性能の USPM を開発し,世界に先駆けた USPM の有効性の実証・技術確立を行う。その結果,技術規格の策定や国際標準化, デファクトスタンダードの先導を目指す。

成果の対外的発信

- ・国内学会、国際会議への論文投稿および国際会議での発表、また国内、海外ジャーナルへの積極的投稿を行い、本事業で開発している要素技術の情報発信を国内外両方ににおいて実施している。

	2018	2019	2020	2021	2022
原著論文（発行済み）	2	2	10	10	4
原著論文(未発行)	0	0	0	6	5
その他著作物	0	0	0	0	0
招待講演	0	0	0	0	1
口頭発表	2	18	17	30	19
ポスター発表	0	3	1	0	3
知財出願	0	2	1	0	0
受賞	0	2	3	0	3
報道	0	0	0	0	0

国際的な取組・情報発信

- ・国際会議への論文投稿および国際会議での発表、また海外ジャーナルへの積極的投稿を行い、本事業で開発している要素技術の国際的な情報発信を実施している。

本事業で開発した要素技術の展望

項目名：アクティブゲートドライバの開発

高機能コントローラを用いたデジタルツインによる回路特性改善・状態監視。フィードバックへ展開可能

システム全体の高効率化、スイッチング速度、サージ電圧をリアルタイムコントローラで可変可能な変換器の実現

項目名：ノイズフリーEMCフィルタの開発

9 kHz～GHz以上までの広帯域ノイズ抑制技術へ発展していく

項目名：瞬時デジタル駆動制御向け制御手法・ハードウェアの開発

開発した要素技術を組み込んだUSPMモジュールを開発した場合の波及効果として・超高速サンプリングによってリアルタイムでの波形解析を制御系に反映させるシステム

メカトロ、モーション系での制御系の再構築（瞬時制御の発展）

項目名：USPMのマスター コントローラとシステム応用技術開発

今回のSIPでは電力変換器に着目した拡張性の研究を実施した。今後は負荷(モータ)も含めたパワエレシステムの拡張性への展開が考えられる。