

日本国土開発未来研究財団 学術研究助成事業 研究成果発表会  
中間発表

# 新しい電力変換器D-EPCを用いた 電動モビリティの電力変換損失低減の研究

2023/11/24  
東京電機大学 未来科学部  
ロボット・メカトロニクス学科  
吉本 貫太郎



**E-Mobility LAB.**  
Tokyo Denki University

# Contents

- 本研究の目標と進捗 (Summary)
- 研究背景
  - 市場における電動化の進展
  - 電動化とCO<sub>2</sub>排出量削減について
- 提案する電力変換器D-EPCを用いたハイブリッドシステムの概要
- 研究目標の進捗・成果
  - 目標1 損失(効率)計算手法と実験による検証
  - 目標2 昇圧電圧指令の生成方法 (実験結果は目標4とあわせて報告)
  - 目標3 損失低減の駆動方法
  - 目標4 昇圧制御による、ハイブリッドシステム制御の実験確認
- 今後の方向性・予定



# 本研究の目標 電力変換システムの電力変換損失1/3

## 目標1 電力変換システムの直接変換化とその損失の計算手法の確立

損失の理論的計算手法の確立、損失低減効果を明らかに

## 目標2 電源電圧の最適な設計手法の構築

複数の電源電圧の低減・最適化によって電力変換損失を低減

## 目標3 新スイッチング制御の開発による損失低減

新スイッチング制御、高速処理FPGAを用いたコントローラによる実現

## 目標4 シリーズハイブリッドシステム適用へ向けたD-EPC応用研究

昇圧制御による、ハイブリッドシステム制御

# 昨年度の進捗

目標1 電力変換システムの直接変換化とその損失の計算手法の確立

- ・損失計算による電力変換損失半減の実現可能性

目標2 電源電圧の最適な設計手法の構築

目標3 新スイッチング制御の開発による損失低減

- ・新スイッチ制御の実現、電流リップルの補償制御
- ・新スイッチ制御時の充電電力の理論的導出

目標4 シリーズハイブリッドシステム適用へ向けたD-EPC応用研究

- ・電力配分を用いた昇圧制御の実現

実績： 論文誌投稿 1件査読中、2件準備中  
国際会議(査読付) 1件、国内学会 4件



# 今年度の進捗

目標1 電力変換システムの直接変換化とその損失の計算手法の確立

- ・損失計算のモデル化、実験検証により妥当性を確認

目標2 電源電圧の最適な設計手法の構築

- ・昇圧制御の電圧指令値決定方法の提案

目標3 新スイッチング制御の開発による損失低減

- ・新たな電力配分制御による駆動方法のSim確認

目標4 シリーズハイブリッドシステム適用へ向けたD-EPC応用研究

- ・電力配分を用いた昇圧制御によるモータ昇圧駆動の実験検証

実績： 論文誌投稿 1件  
国際会議(査読付) 2件、 国内学会 3件



# Background

## 進む乗用車の電動化

2022では中国のBEV新車販売台数は、日本の新車販売台数全体よりも多い

BEV販売台数	2021	2022
EU	88万台（新車販売9%）	112万台（新車販売12%）
中国	291万台（新車販売11%）	536万台（新車販売20%）

“EUの2022年の新車登録台数、BEVが初めて100万台超え”, JETRO, <https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/02/9506f0fd1b5dc0f1.html>  
“22年中国新車販売、2%増の2686万台 EVは536万台”, 日本経済新聞, <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGM06B2I0W3A100C2000000/>  
“中国EV販売、最高の291万台”, 日本経済新聞, <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC127E30S2A110C2000000/>

## 大型車・建機の電動化の課題

大型車：大容量バッテリー・充電が課題、EV化の開発・普及が進んでいない

建機：充電ステーションへ移動が困難

EU BEVトラック登録数 346台 → 1041台 Heavy trucks 全体 25万台の販売台数  
CY2021 CY2022

“Volvo Trucks leads the electric truck market in Europe”, Volvo, <https://www.volvotrucks.jp/ja-jp/news/press-releases/2022/feb/volvo-trucks-leads-the-electric-truck-market-in-europe.html>

“Volvo leads the booming market for electric trucks”, Volvo, <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2023/feb/volvo-leads-the-booming-market-for-electric-trucks.html>

“Commercial vehicle registrations: -14.6% in 2022; -5.1% in December”, ACEA, <https://www.acea.auto/cv-registrations/commercial-vehicle-registrations-14-6-in-2022-5-1-in-december/>

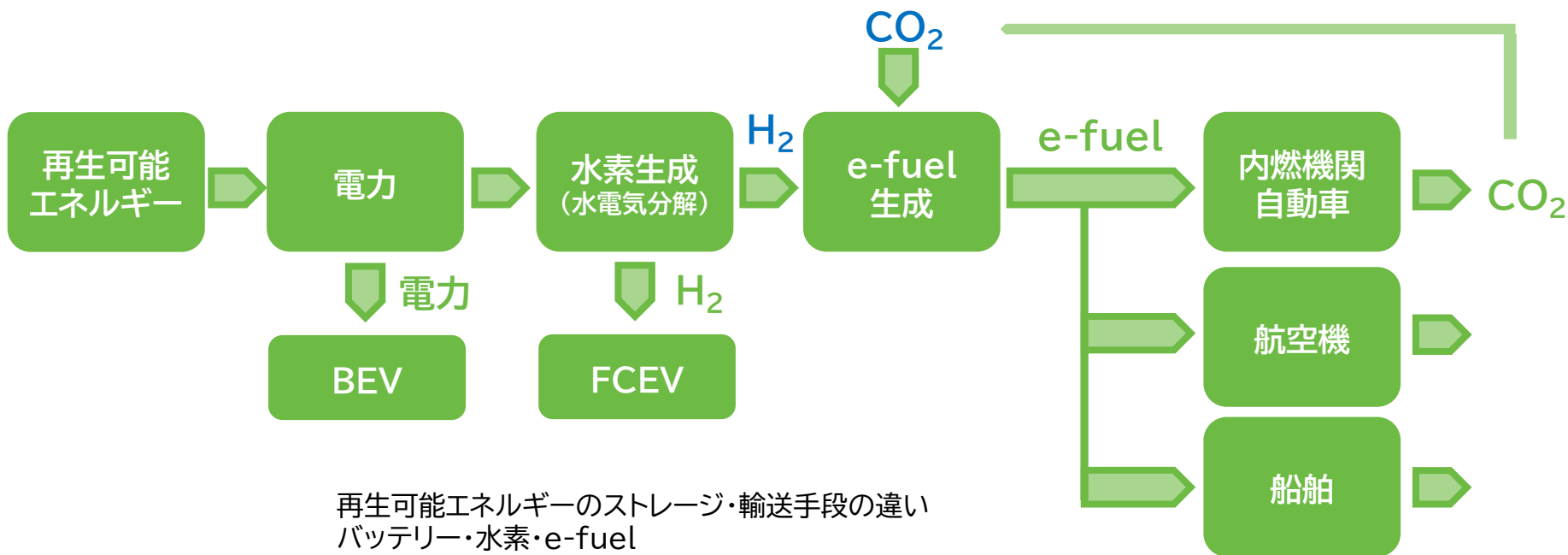


# e-fuel (合成燃料)は？

再生可能エネルギーによる水素とCO<sub>2</sub>を合成した燃料  
(燃焼してもCO<sub>2</sub>は増えない)

既存アセットを活用できる方法：

燃料のインフラだけでなく、導入済みの車両・設備などに

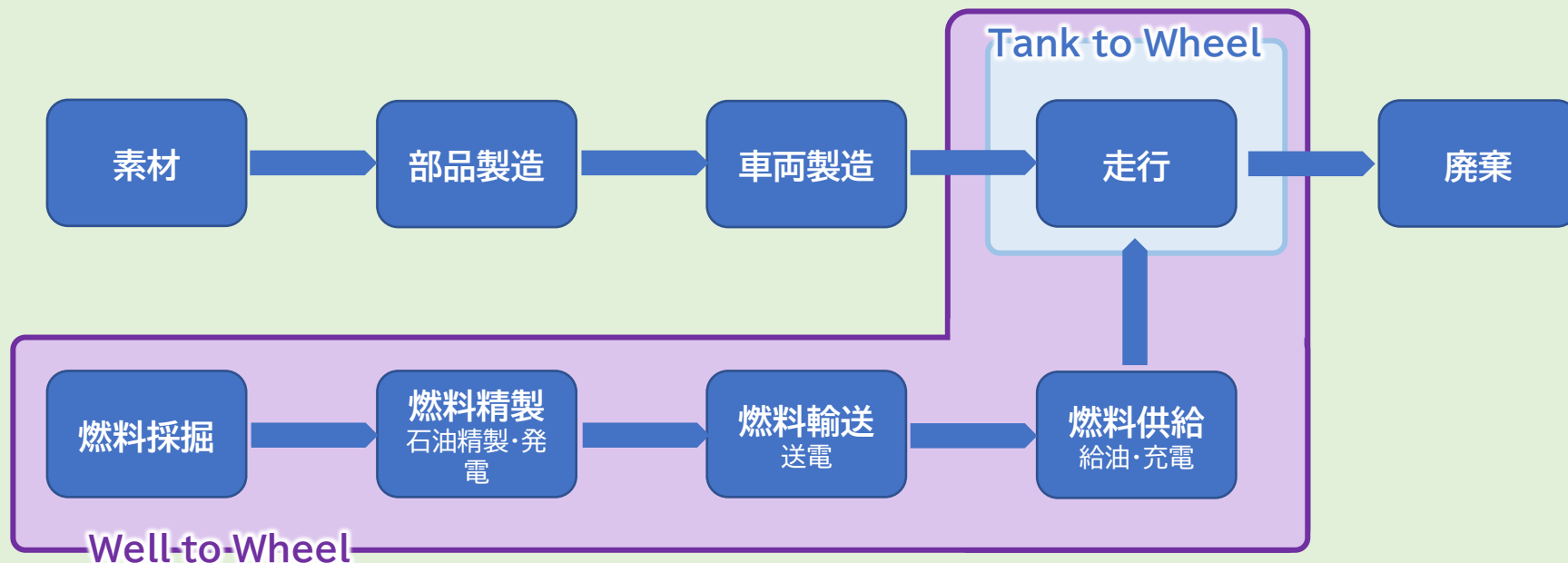


# 電動化とLCA

走行時の比較だけでなく、製造・廃棄のCO<sub>2</sub>排出量を含めた評価

LCA : Life-Cycle Assessment

## Life-Cycle-Assessment(LCA)

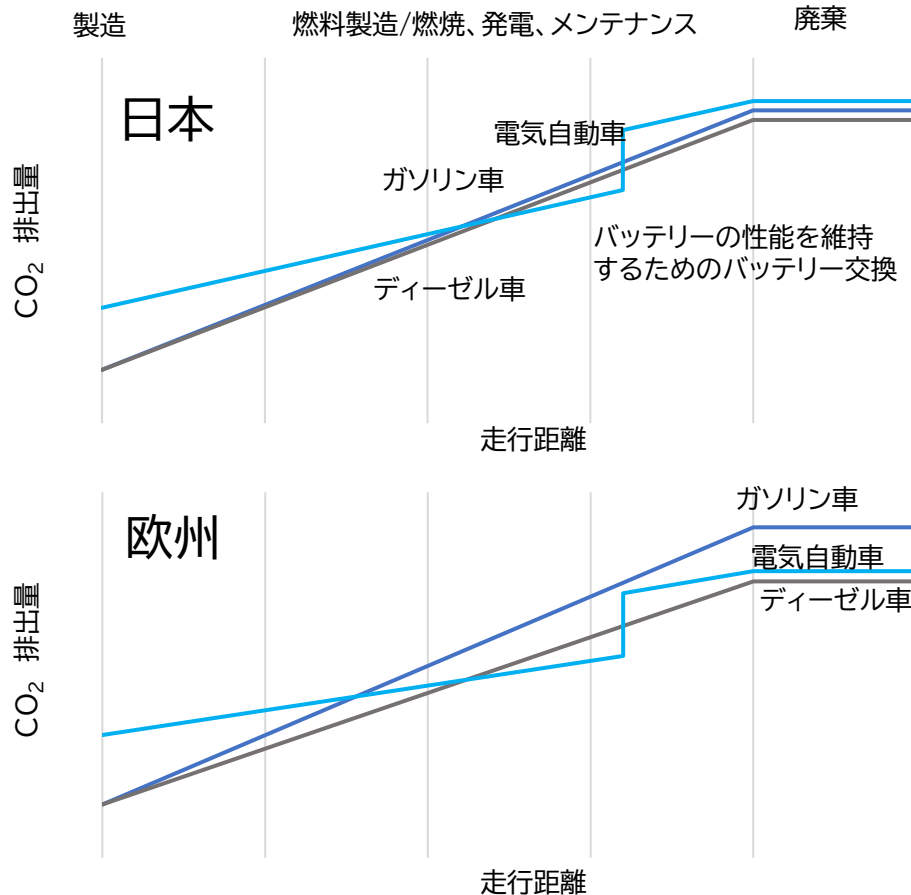




# LCAの報告例

MAZDA Webページより

具体的な算出方法や使用したパラメータは論文中に記載（複数文献の情報、他社BEV情報などを利用）



バッテリー製造時CO2排出量  
177kg/kWh（複数文献の平均値として）

BEV 容量35.8kWh、電費 e-GOLF MY2018相当

バッテリー交換を走行16万kmで行う前提

20万km走行後の廃棄時には  
BEVはICEよりトータルCO<sub>2</sub>多い

欧州ではBEVがガソリンICEよりも優位  
電力発電時のCO<sub>2</sub>が日本比65%と少ない

参考文献を元に、MAZDA webサイトに掲載されている図に相当するグラフを講演者が作図

“LCA(ライフサイクルアセスメント)”, MAZDA Webサイト, <https://www.mazda.com/ja/sustainability/lca/>

Kawamoto et al., “Estimation of CO2 Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA”, Sustainability 2019, 11(9), 2690;

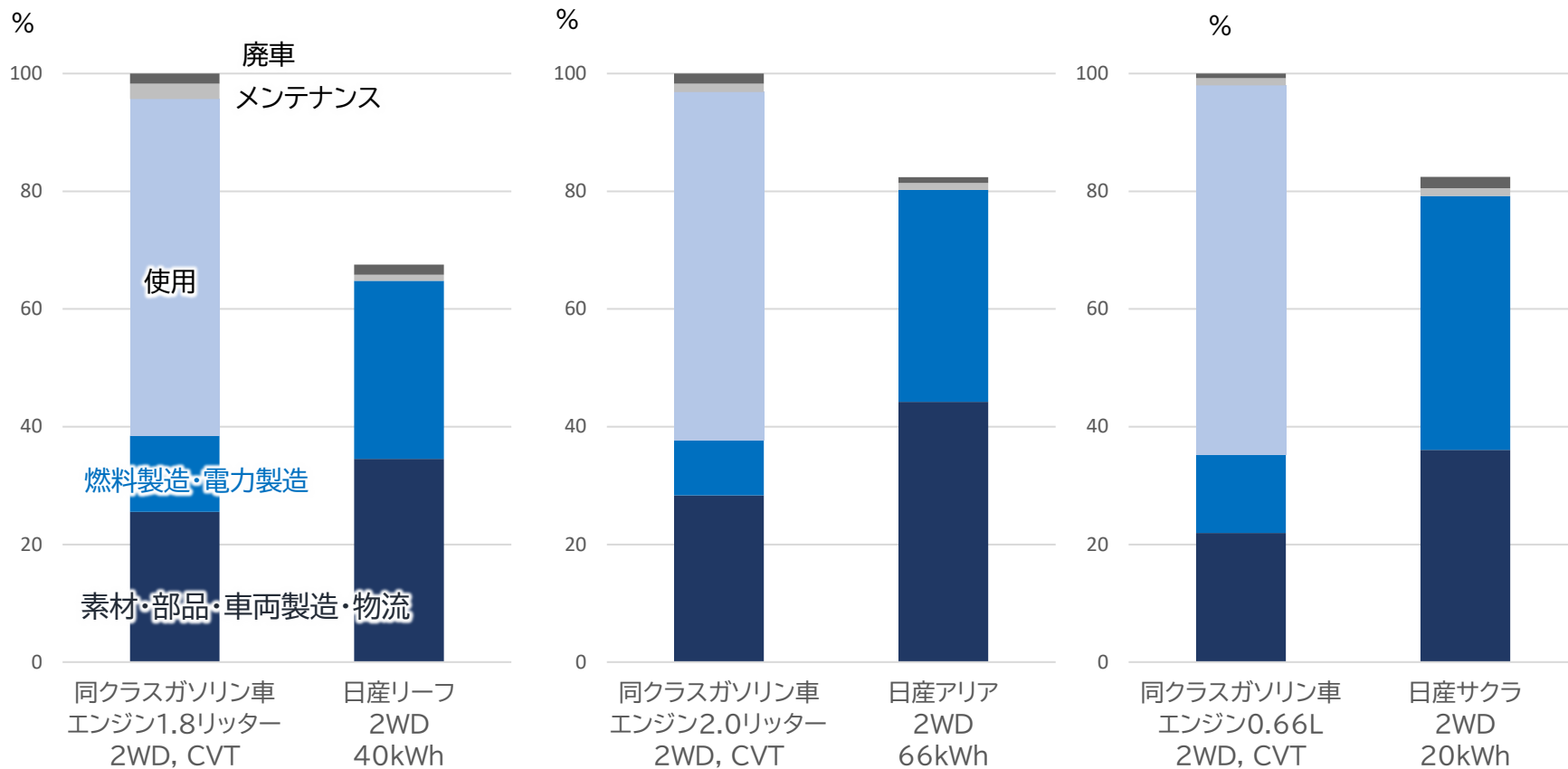


# LCAの報告例

NISSAN Webページより

CO<sub>2</sub>等価排出量を同クラスのガソリン車のを100%としたときのBEVを相対評価

具体的な算出方法や使用したパラメータは不明



参考文献を元に講演者が作図

# バッテリー製造におけるCO<sub>2</sub>の内訳 近年の状況

CATL: 10.5 kg/kWh (Scope 1 + Scope 2)

CATLのESGレポート2022 Greenhouse Gas (GHG) Emission

単位[t/MWh]であるので、数値そのまま[kg/kWh]

indicator	unit	2021	2022
Emission intensity			
GHG emission intensity	tCO <sub>2</sub> e/MWh	13.98	10.50
Cell	tCO <sub>2</sub> e/MWh	11.95	9.28
Module	tCO <sub>2</sub> e/MWh	0.51	0.33
Pack	tCO <sub>2</sub> e/MWh	0.26	0.21
Others	tCO <sub>2</sub> e/MWh	1.27	0.68
GHG emission intensity decline	%	10.33	24.89

GHG emission intensity  
の内訳

“Environmental, Social and Governance (ESG) Report 2022”, CATL, <https://www.catl.com/en/about/responsibility/>

レポートを元に講演者が表を作成



セル製造の前工程、原材料などは？

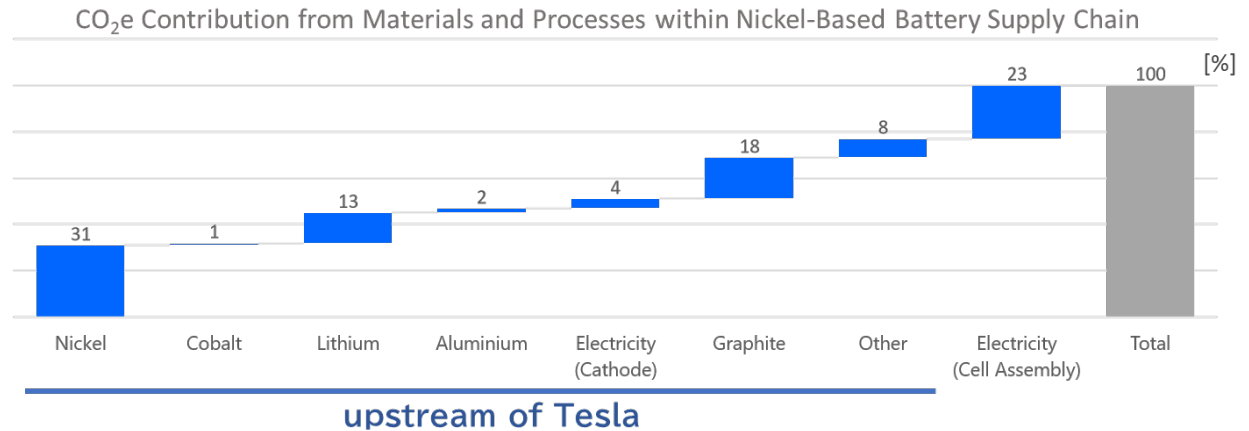


# バッテリー製造におけるCO<sub>2</sub>の内訳

Tesla, Samsung SDIのレポートから、前工程はセル製造の3.3倍程度

## Tesla

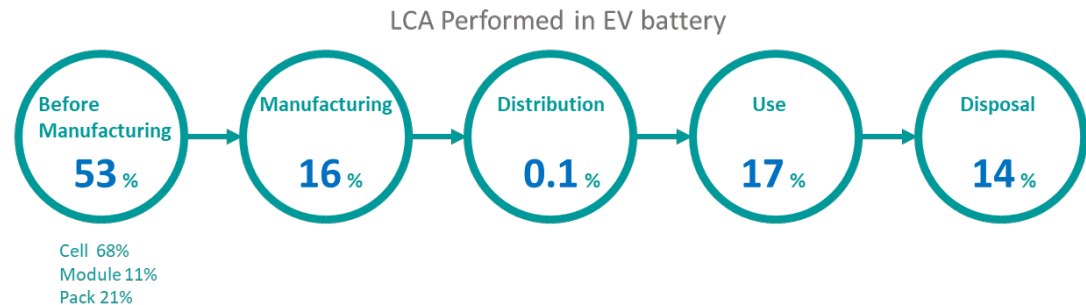
セル製造：前工程  
= 23 : 77



"2021 Impact Report", Tesla, [https://www.tesla.com/ns\\_videos/2021-tesla-impact-report.pdf](https://www.tesla.com/ns_videos/2021-tesla-impact-report.pdf) レポートを元に講演者が図を作成

## Samsung SDI

製造：前工程  
= 16 : 53



"Sustainability Report 2021", Samsung SDI, <https://www.samsungdi.com/sustainable-management/sustainability/report/sustainability-report.html>

レポートを元に講演者が図を作成

両社ともに 前工程 ÷ 製造 × 3.3



過去のレビューペーパーなどを元にLCA検討

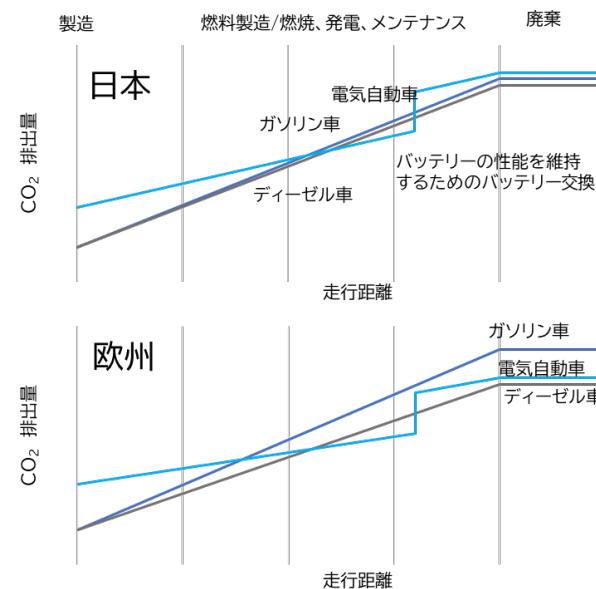
バッテリー製造時CO2排出量 **177kg/kWh**  
(複数文献の平均値として)

BEV 容量35.8kWh、電費 e-GOLF MY2018相当



現在のバッテリー製造のCO2排出量の推定値

**35 kg/kWh**  
(ESGレポートなどを元に)



# 乗用車以外のCO<sub>2</sub>削減の取り組みも必要

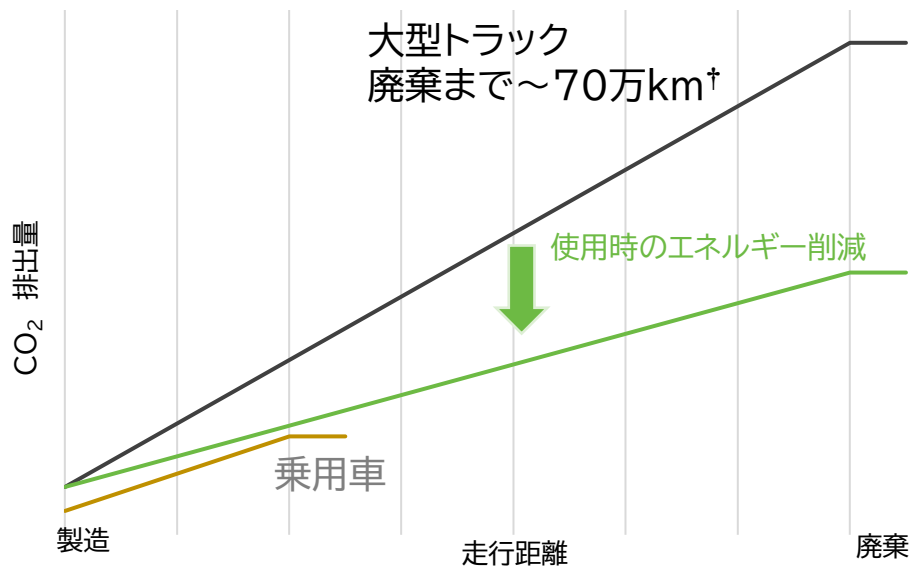
廃棄までの走行距離・使用時間の長い車両  
「使用時のエネルギー消費削減」は大きな効果

## 走行抵抗を減らす

- 空力性能の向上
- 軽量化

## パワートレイン効率を高める

- 電動化
  - インバータ・モータ効率の向上
  - ドライブトレイン(ギア)効率の向上
  - 走行中給電によるバッテリー搭載量低減(軽量化)

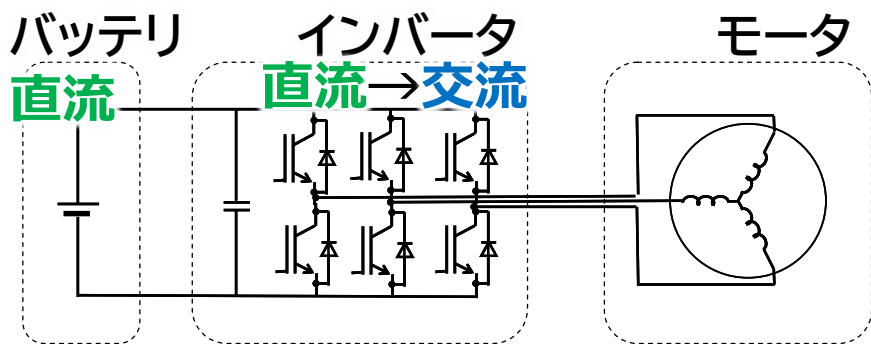


† “トラックの市場要件の整理”, 環境省, <https://www.env.go.jp/content/900444223.pdf>

# 電動化 インバータによるモータ駆動

効率の良い交流モータを半導体スイッチで駆動する技術

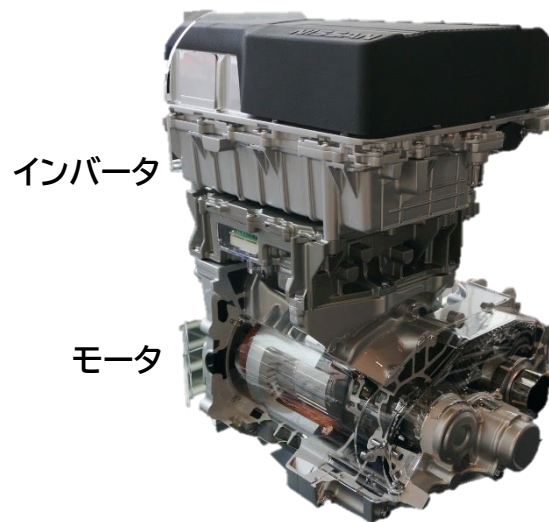
一般的なEVの構成 1電源を入力



モータ駆動の主は交流モータ

EV,ハイブリッド,燃料電池車, 電車, 家電, エレベータ, ドローン

電源の直流を交流に変換するインバータを用いる

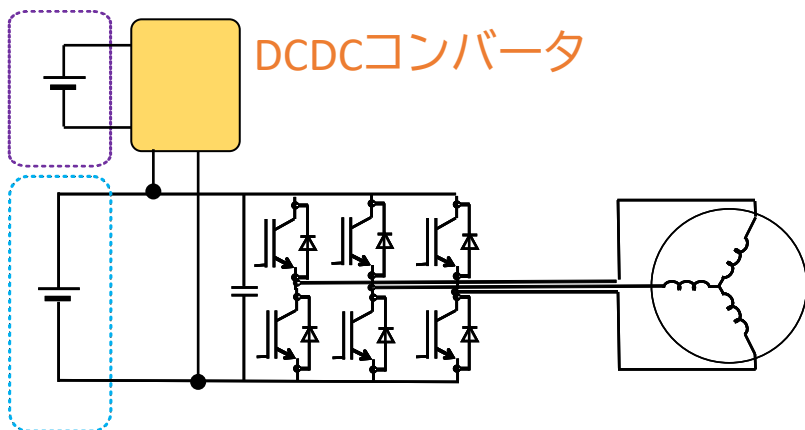


電気自動車のモータ・インバータ  
(日産リーフ)

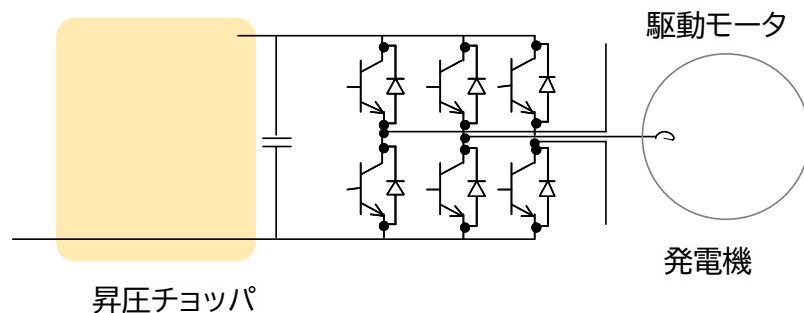
# DCDCコンバータ・昇圧チョッパ

直流の電圧を可変にする回路 2電源システムや高出力ハイブリッドに用いられる

燃料電池車 2電源を入力



ハイブリッド車 電圧を昇圧



異なる特性・電圧の電源は直接接続できない  
2電源の入力では、DCDCコンバータが必須

バッテリー電圧を高く昇圧し、高出力化

## DCDCコンバータ・昇圧チョッパの課題

回路に用いるコイルは重く・大きい  
電力損失が発生する



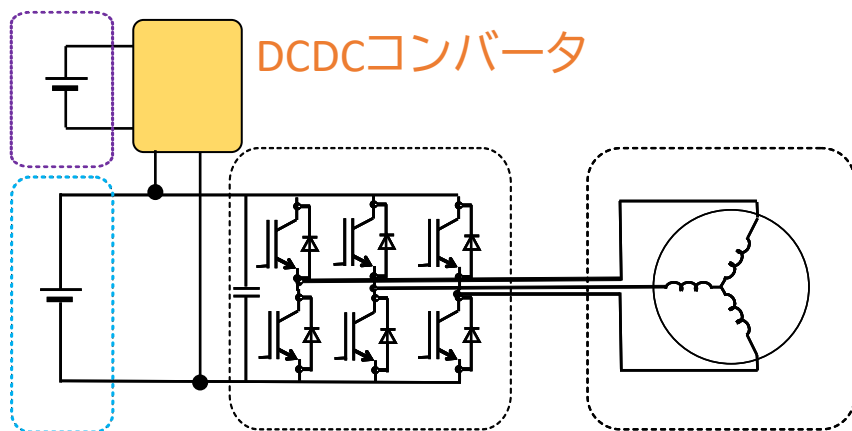


# 提案するD-EPCとは？

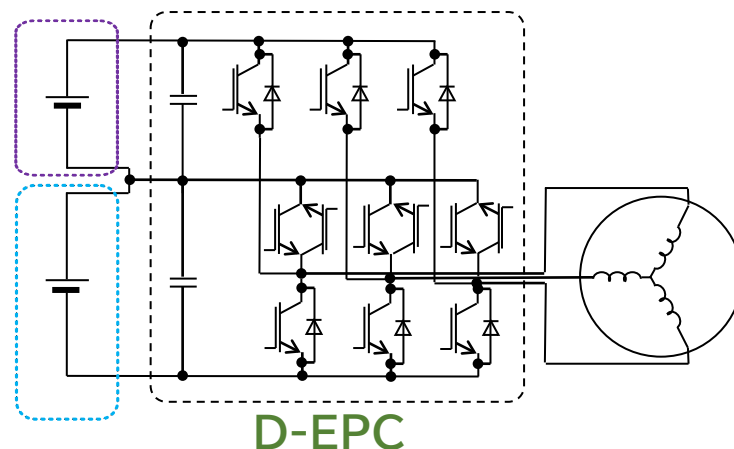
D-EPC = 2電源入力のインバータ  
Direct/Dual - Electric Power Converter

燃料電池車 2電源を入力

従来の回路構成



D-EPCを用いた回路構成



## D-EPCを用いた回路構成

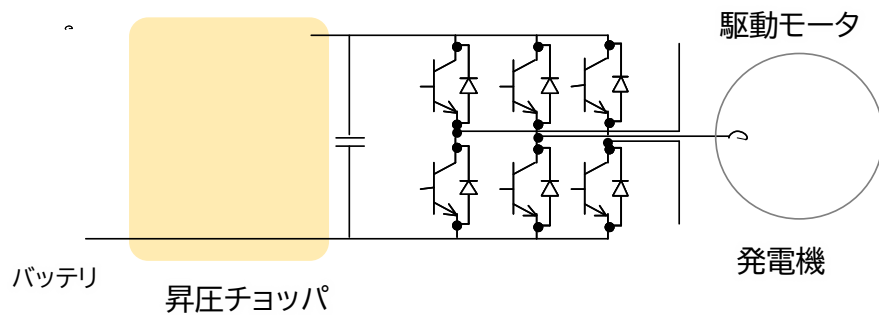
- DCDCコンバータを用いず、インバータの回路に半導体スイッチを追加
- 低損失 : モータと電源の間には半導体スイッチのみで直接接続
- 小型・軽量化 : 大きく重いコイルを用いない
- 高出力化 : 電源直列の電圧を出力し、モータの高出力化が可能



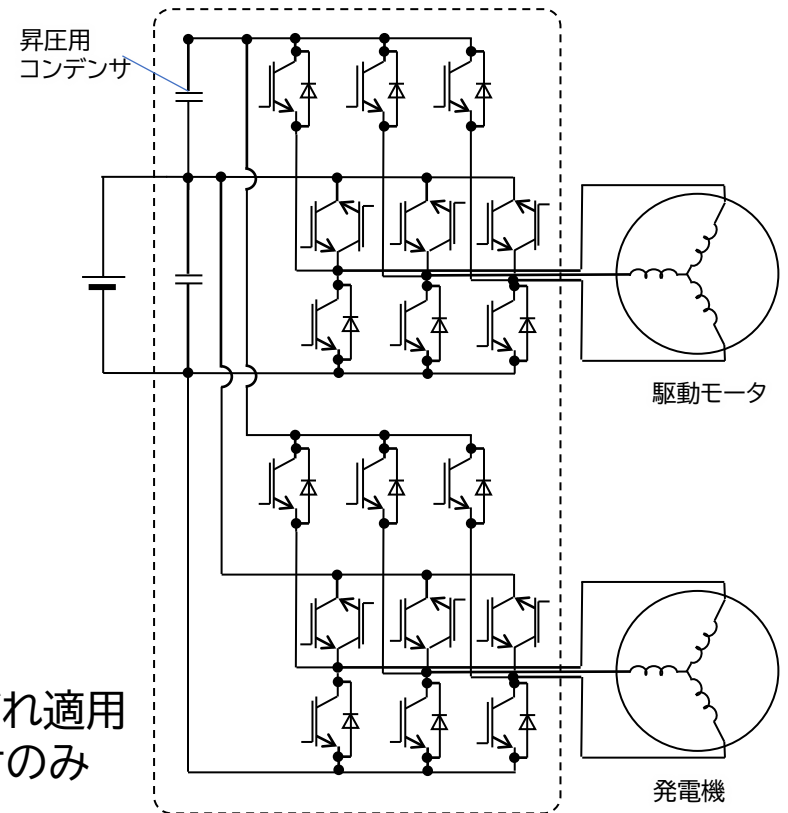
# D-EPCを用いたハイブリッドシステム

ハイブリッド車 電圧を昇圧

従来の回路構成



D-EPCを用いた回路構成



D-EPCを用いたハイブリッドシステム

D-EPCをモータ・発電機にそれぞれ適用  
電源の1つは接続せず、コンデンサのみ  
⇒コンデンサの電圧を昇圧

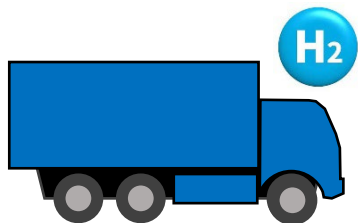


# D-EPCを用いたアプリケーション

2電源を入力  
燃料電池・架線式大型車

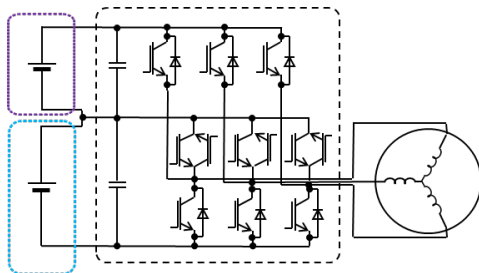
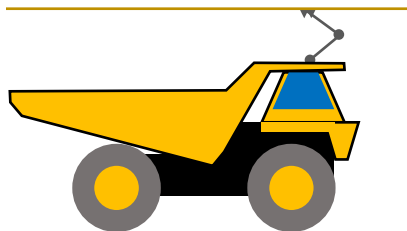
燃料電池車  
燃料電池+バッテリー

長距離走行の大型車



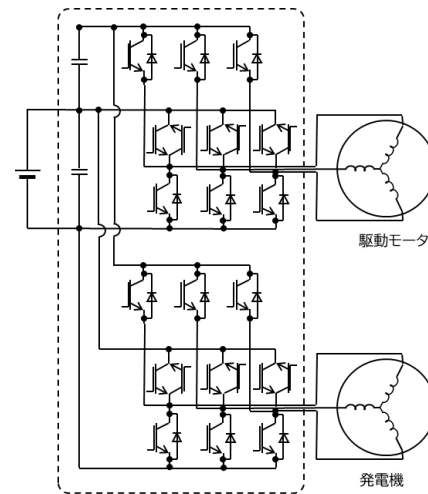
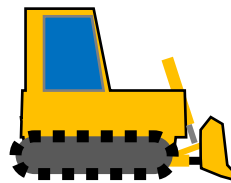
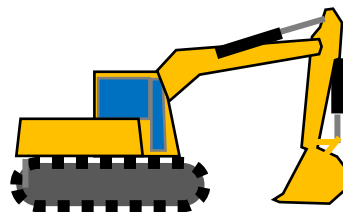
トロリー充電式ダンプトラック  
架線+バッテリー

架線で走行とバッテリー充電  
架線のないエリアも走行可



ハイブリッドシステム  
大型車・建設機械

ハイブリッドシステム  
エンジン発電機+バッテリー



バッテリー充電・H<sub>2</sub>充填が難しい使用環境用

効率の良い発電点でエンジン動作  
⇒CO<sub>2</sub>の排出量を削減



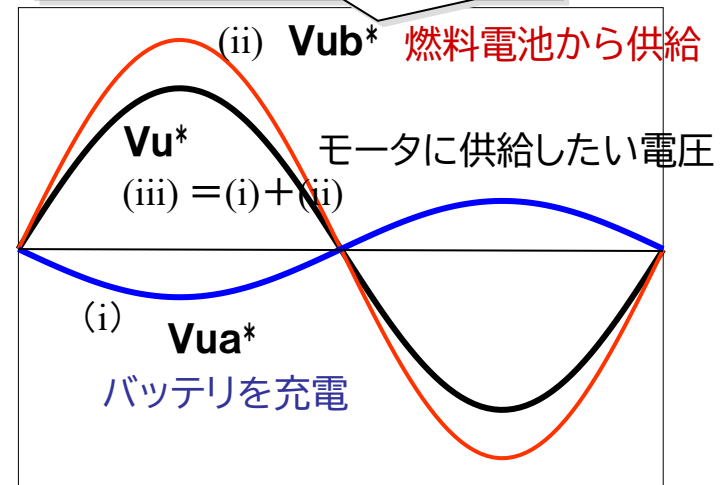
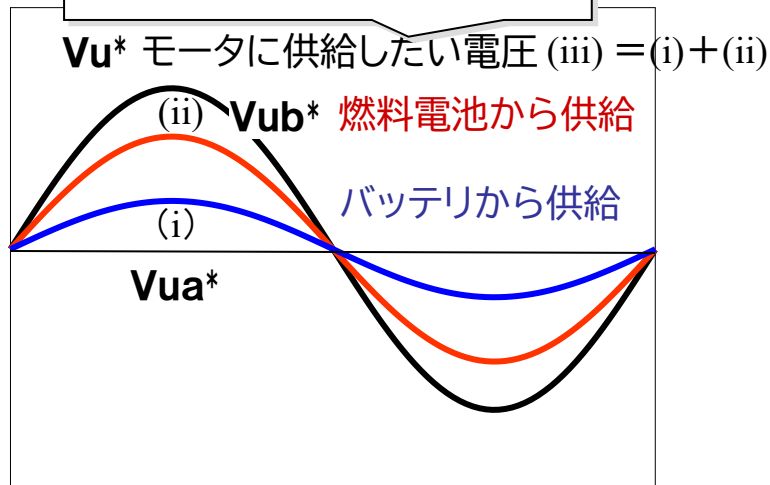
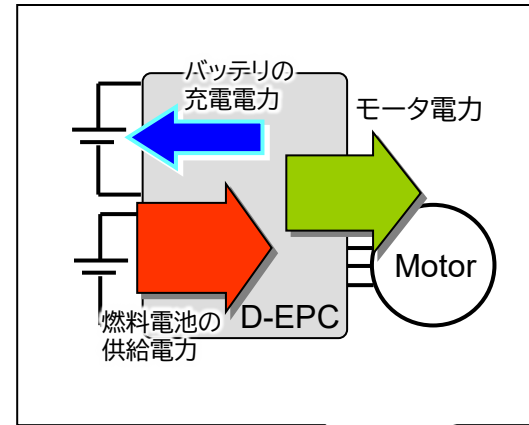
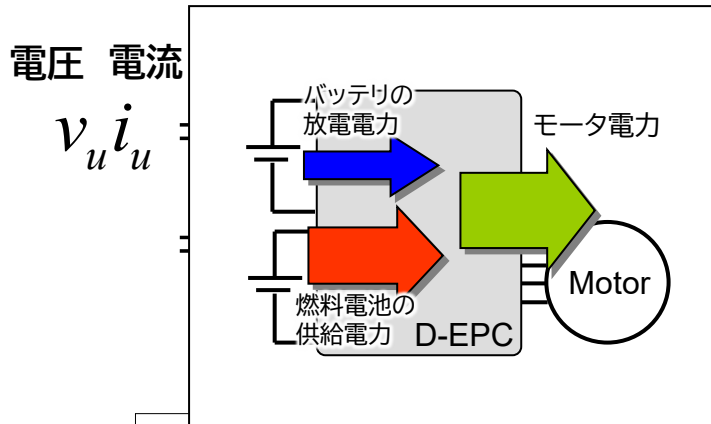
# D-EPCによる2電源の電力配分

どちらの電源をどれだけ使うか？  
エネルギーマネジメント

電力 = 電圧 × 電流

モータに流れる“電流”が回転トルクをつくる = 電流は運転状態で決まる

2つの電源に接続するスイッチでモータに加える電圧をつくる ⇒ スイッチの操作で電圧をそれぞれ配分

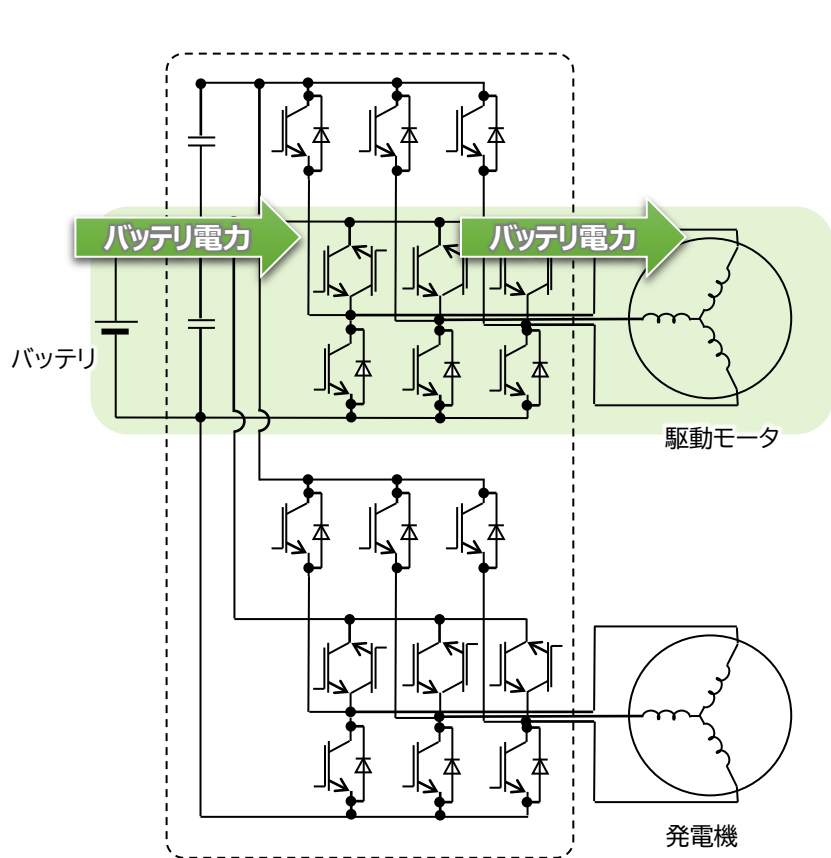


# ハイブリッドシステムの駆動

## バッテリーでの駆動(EVモード)

直接変換:

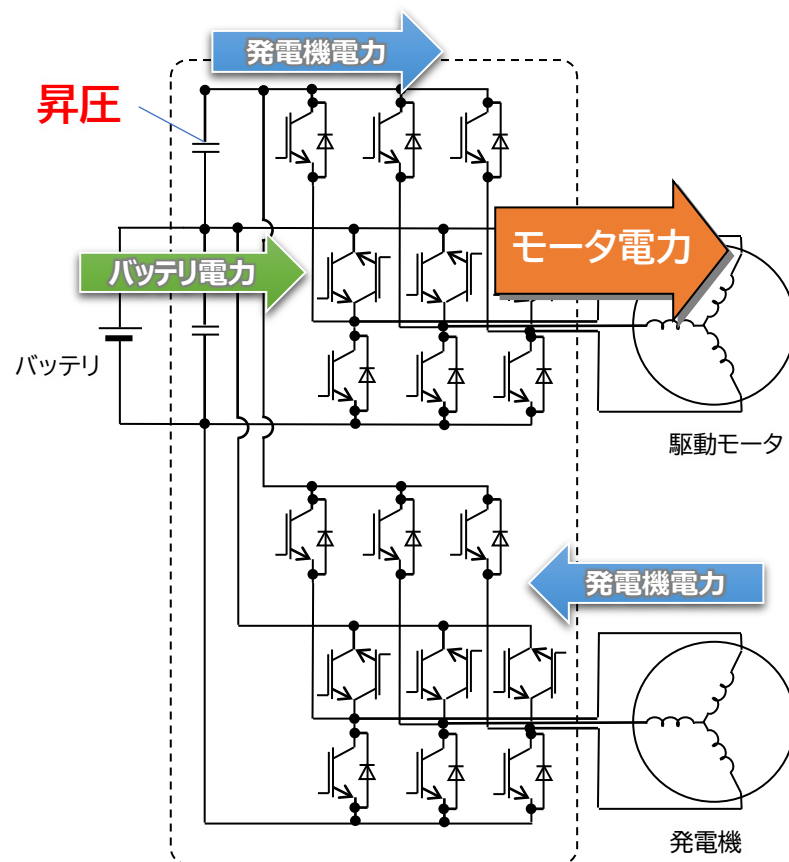
バッテリーとインバータ・モータの間で損失発生なし



## 発電機昇圧駆動(ハイブリッド)

昇圧と電力合成:

発電電力を昇圧、バッテリー電力と合わせモータ駆動



# 目標1 電力変換システムの直接変換化とその損失の計算手法の確立

新たな変換システムとしての効率の計算手法を検討、妥当性を実験で検証した

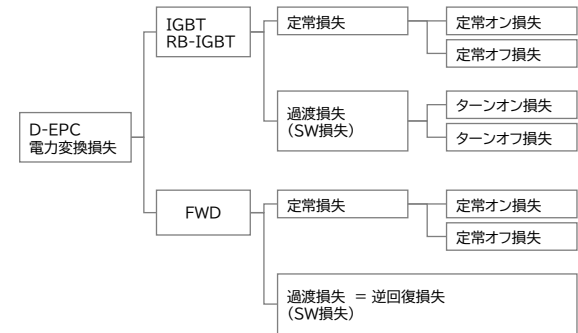
## 計算手法>

インバータの電力変換損失を求める方法をもとに、D-EPCの回路での変換損失をモデル化

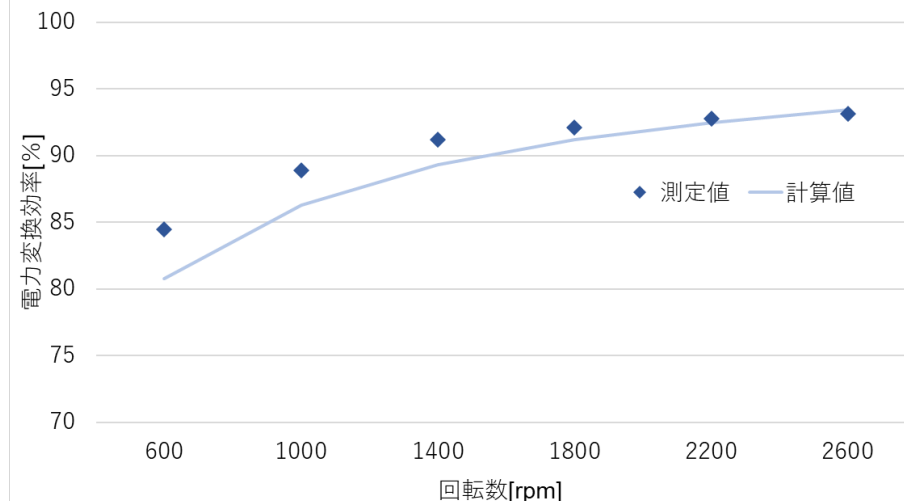
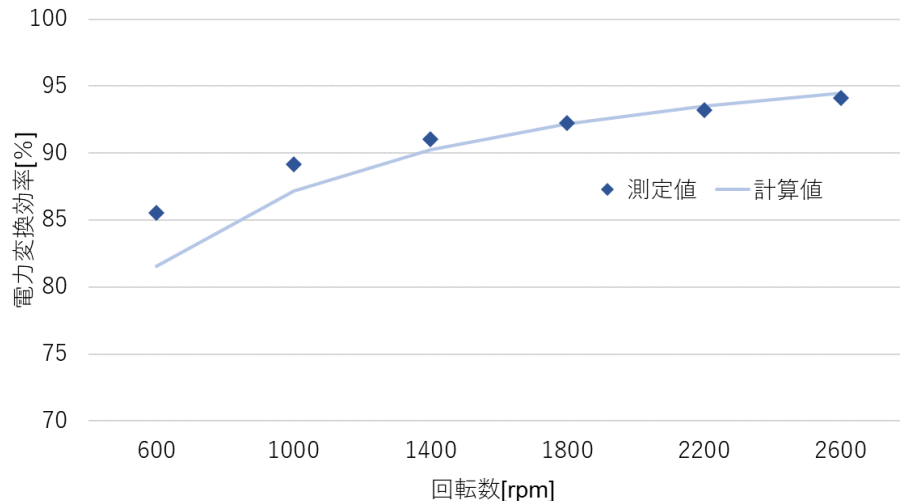
## 計算手法の妥当性検証>

計算手法の妥当性が確認できた

出力の小さい動作点では、変換損失の誤差が効率の誤差に表れるが高回転(出力大)領域では、変換損失の誤差が小さい



## 効率測定実験結果と計算値の比較>



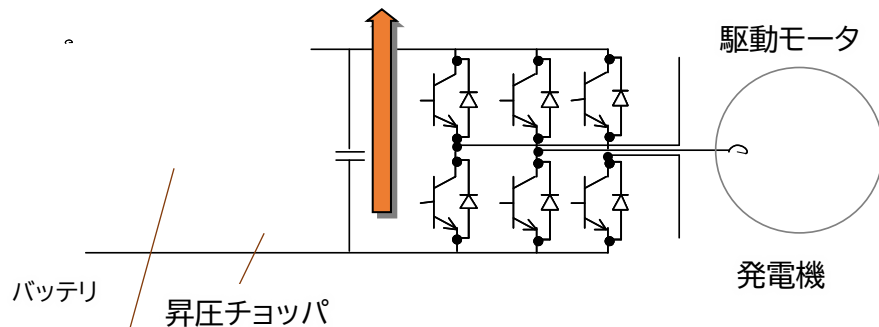
電源A 150V, 電源B 50 V,  $i_{q\_Ref} = 1A$



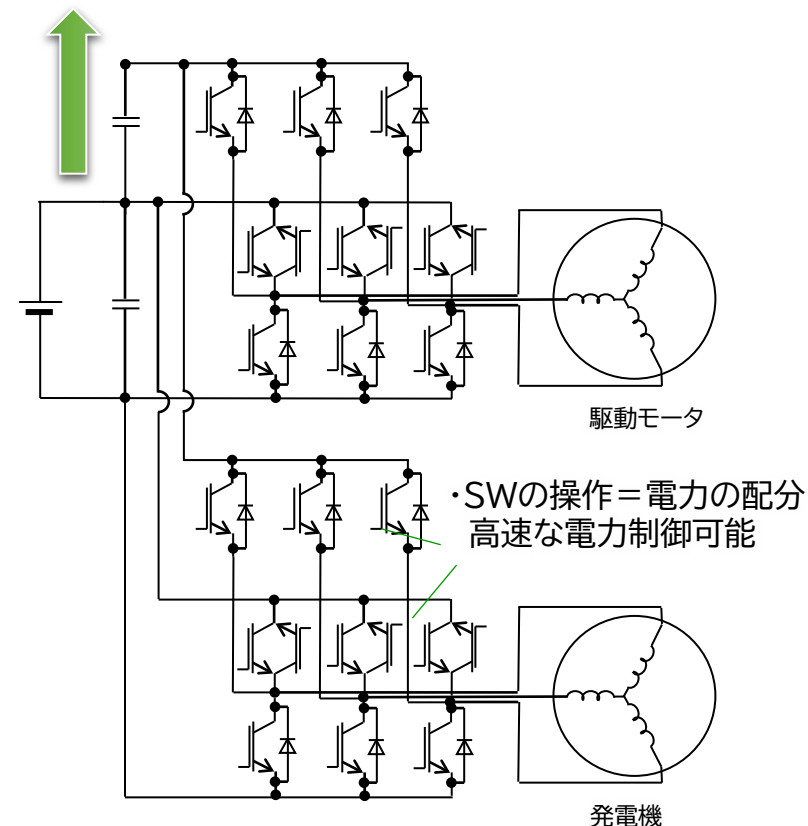
# 提案システムでの効率向上・損失低減のキーポイント

- ・昇圧チョッパ 昇圧不要時も損失発生  
非線形な制御対象  
→ 高速制御の実現難

- ・昇圧チョッパレス 損失部の削減
- ・電力配分制御により高速な昇圧制御  
→ 高電圧を必要な時間だけ昇圧



- ・SWの操作と出力電圧は非線形な関係
- ・大きなLを持ち、昇圧・電力制御の応答に影響

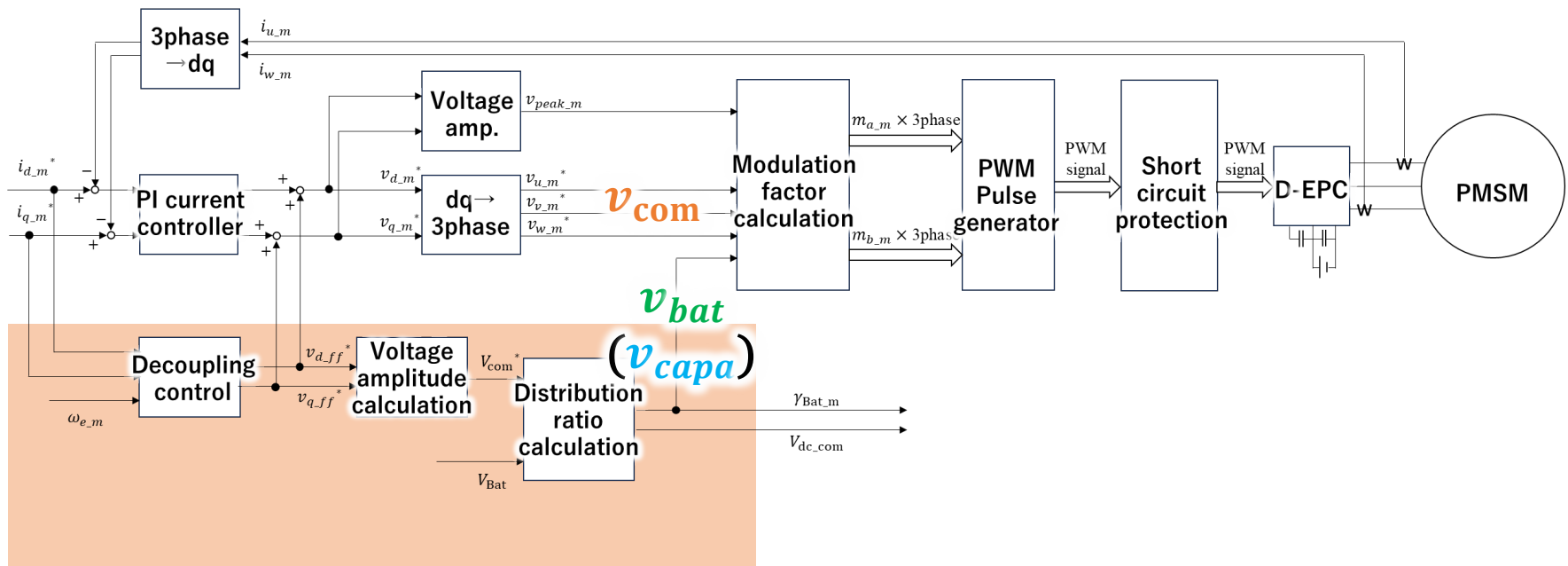


## 目標2 電源電圧の最適な設計手法の構築

モータ駆動に必要な最低限のコンデンサ電圧を検討

➡ 不要に昇圧せず、スイッチング損失を削減

実験により提案制御の有効性を検証した（目標4と合わせて実験結果報告）



$$v_{d\_ff}^* = -L_{q\_m} \cdot \omega_{e\_m} \cdot i_{q\_m}^*$$

$$v_{q\_ff}^* = \omega_{e\_m} (L_{d\_m} \cdot i_{d\_m}^* + \psi_{dq\_m})$$

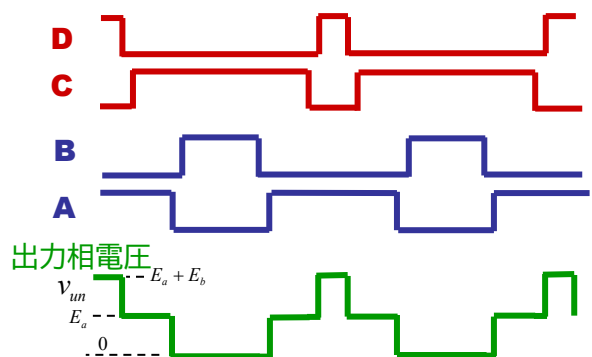
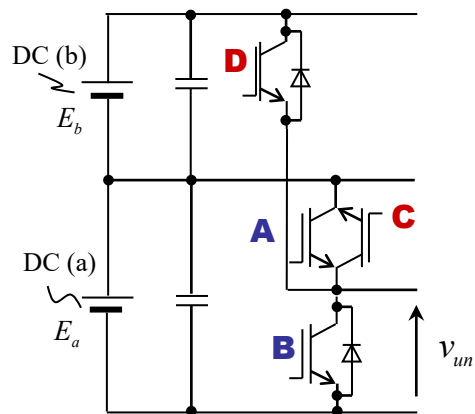
昇圧電圧指令

$$V_{com}^* = 2k_v \sqrt{\frac{2}{3} (v_{d\_ff}^{*2} + v_{q\_ff}^{*2})}$$



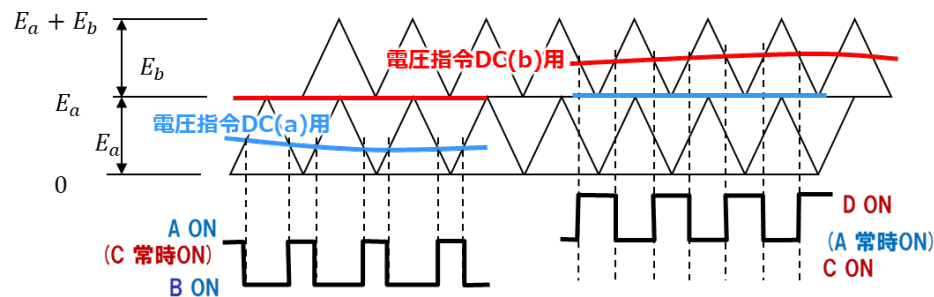
# 目標3 新スイッチング制御の開発による損失低減

## D-EPCスイッチング制御 基本構想



それぞれのスイッチを順次on/off  
モータへの交流電圧を合成・出力

## 新スイッチング制御



マルチレベルインバータの動作方法をもとに電力  
配分制御とその電力の理論式を導出

➡ Sim確認完

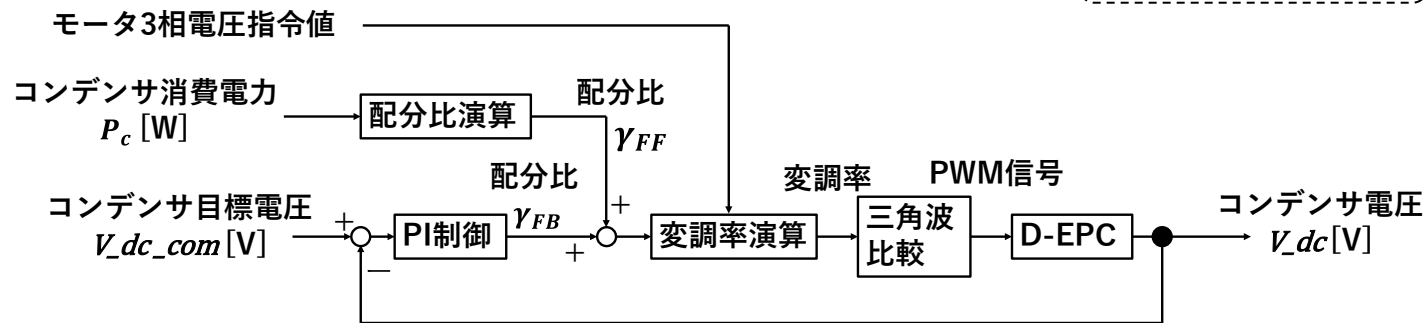
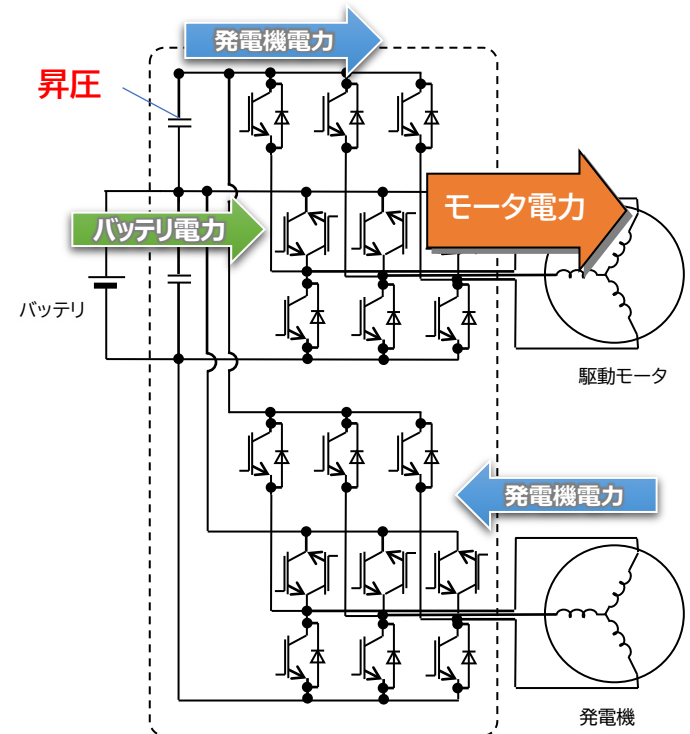
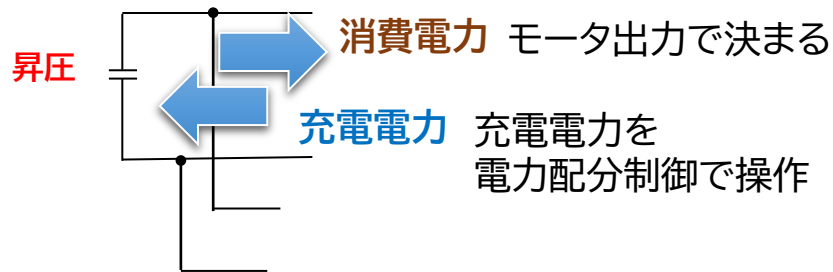
・変換損失を低減できるが、DC電流リップル増

➡ 本制御とこれまでの制御の切替も一案として  
動作トータルでの損失低減を考える

# 目標4 シリーズハイブリッドシステム適用へ向けたD-EPC応用研究

## ハイブリッドシステムの昇圧制御

D-EPCの特徴の電力配分制御により  
コンデンサの電圧を制御する

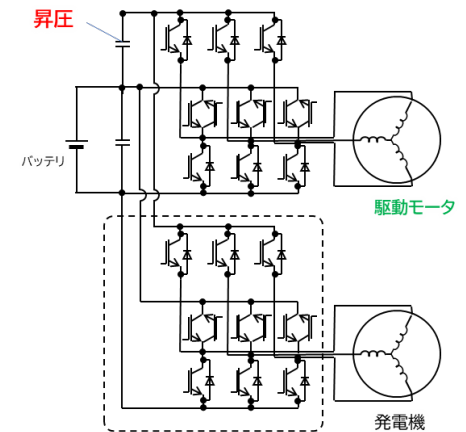
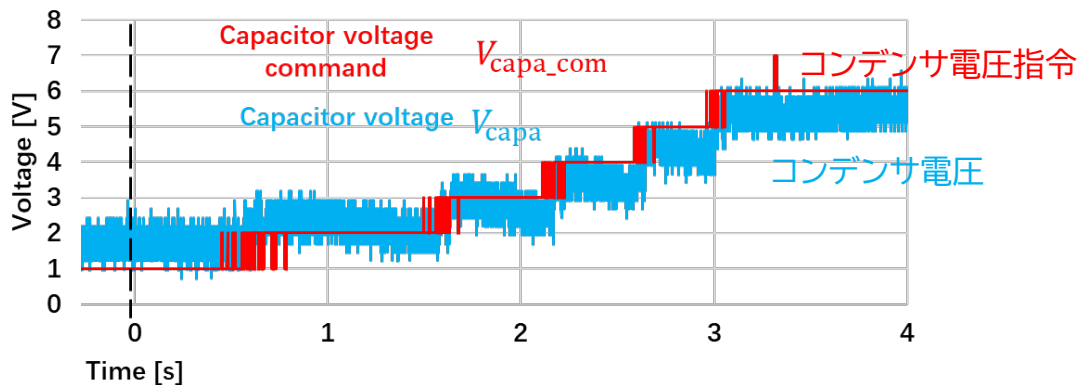
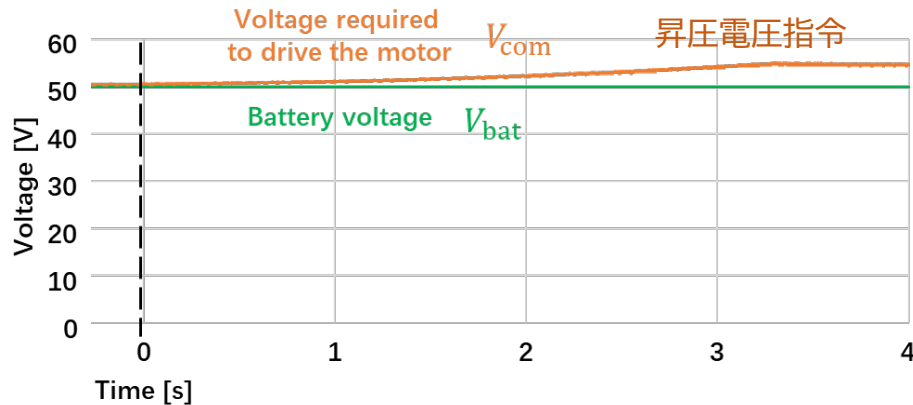


# 目標4 シリーズハイブリッドシステム適用へ向けたD-EPC応用研究

実験環境： 駆動モータとそのD-EPCを新たに追加  
制御： モータの駆動トルクに応じた昇圧電圧指令を生成

実験により、提案する昇圧制御の安定動作を確認できた

実験結果：



# 今後の方向性・予定

目標1 電力変換システムの直接変換化とその損失の計算手法の確立  
実車相当での損失計算と従来システムの比較による効果検証

目標2 電源電圧の最適な設計手法の構築  
出力要求に対する必要電源電圧と昇圧電圧の検討

目標3 新スイッチング制御の開発による損失低減  
損失低減効果の実験確認と全体損失低減効果の見積

目標4 シリーズハイブリッドシステム適用へ向けたD-EPC応用研究  
ミニモデルとしての評価方法とその検証  
駆動車輪空転時の電力制御とその実験確認

