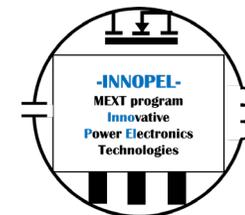




HOKKAIDO
UNIVERSITY



文部科学省



INNOPELシンポジウム2025

次世代高電力密度パワーエレ機器に向けた 高性能コンデンサの研究開発

(北海道大学) 幅崎浩樹

(山梨大学) 奥崎秀典、(九州工業大学) 長谷川一徳、(日本ケミコン) 末松俊造

GaNを用いたパワエレ機器の今後の用途

- ・ サーバ・データセンター
- ・ 通信基地局
- ・ ドローン・ロボット・モビリティ



コンデンサに求められる特性

- ・ 高耐電圧
- ・ 高周波特性 (低ESR)
- ・ 高耐熱性
- ・ 高電力密度
- ・ 高耐久性

本研究

高耐電圧高耐熱導電性高分子固体コンデンサの開発

代表的なコンデンサの特性

	フィルム	セラミックス	AI電解	導電性高分子固体
電気容量	低	低	高	高
耐電圧	>1000 V	>1000 V	~500 V	~100 V
リップル電流特性	高	高	低	高
高周波特性	高	高	低	高
熱安定性	105℃	温度依存性大	105℃	~125℃

INNOPELにおける導電性高分子固体コンデンサの開発目標

- 耐電圧：450 V
- 耐熱性：150℃
- 小型化：従来のフィルムコンデンサ体積の60%



研究開発テーマ
次世代高電力密度パワーエレクトロニクス機器に向けた高性能コンデンサの研究開発

誘電体皮膜・界面評価チーム
(北大) 代表・幅崎
(日本ケミコン) 代表・田中→長原

新規導電性高分子開発チーム
(山梨大) 代表・奥崎
(日本ケミコン) 代表・町田

システム評価チーム
(九州工大) 代表・長谷川
(日本ケミコン) 代表・遠田→吉田
→村上

プロトタイプコンデンサ試作チーム
(北大) 代表・幅崎浩樹
(日本ケミコン) 代表・遠藤→中路

日本ケミコン(株)内全体統括：末松
副統括：町田、村上

小型・高耐電圧・高耐熱新規コンデンサ



主な開発材料・技術

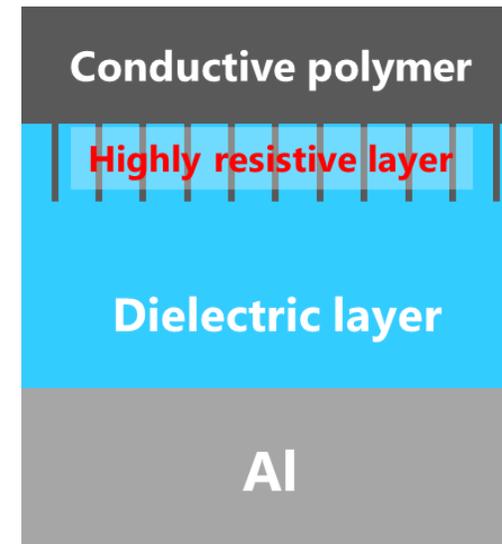
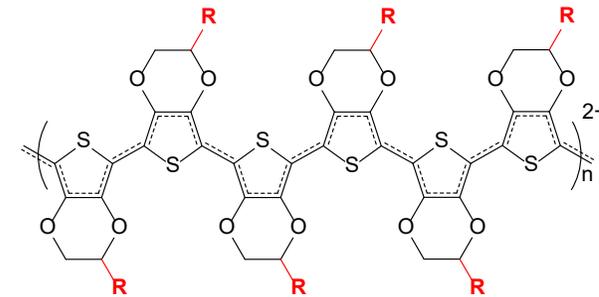
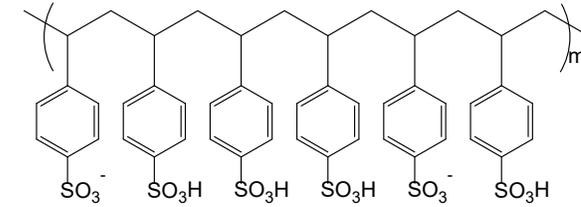
➤ アルキル基導入PEDOT:PSSの開発

- ・ 電気伝導率（特にキャリア密度）の調整
- ・ 耐電圧の向上

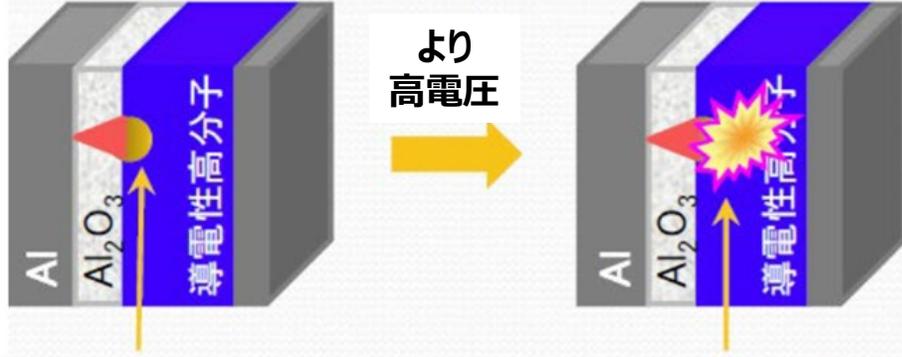
➤ 誘電体／高分子界面への高抵抗層の導入

- ・ 単純な熱水処理による導電性高分子
微量分散層の導入
- ・ 耐電圧の向上

➤ 寿命評価技術



高耐電圧化のアプローチ



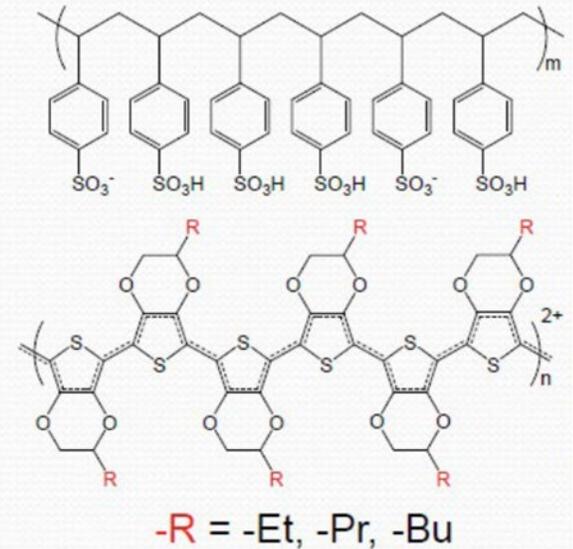
(1) ジュール熱により導電性高分子が絶縁化 ⇒ 漏れ電流低減

(2) 導電性高分子の絶縁破壊電圧を超えるとショートに至る

PEDOT:PSSの絶縁化制御

$$\sigma = N_c e \mu$$

- ① キャリア密度 (N_c) ↓
- ② キャリア移動度 (μ) ↓

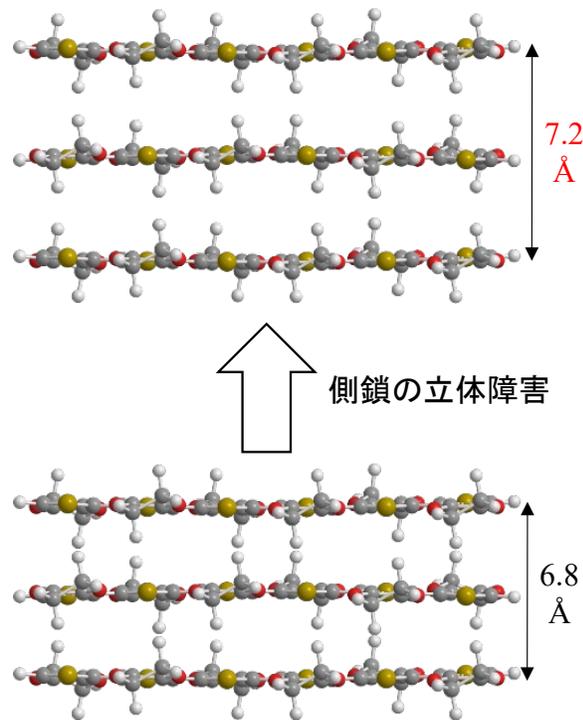
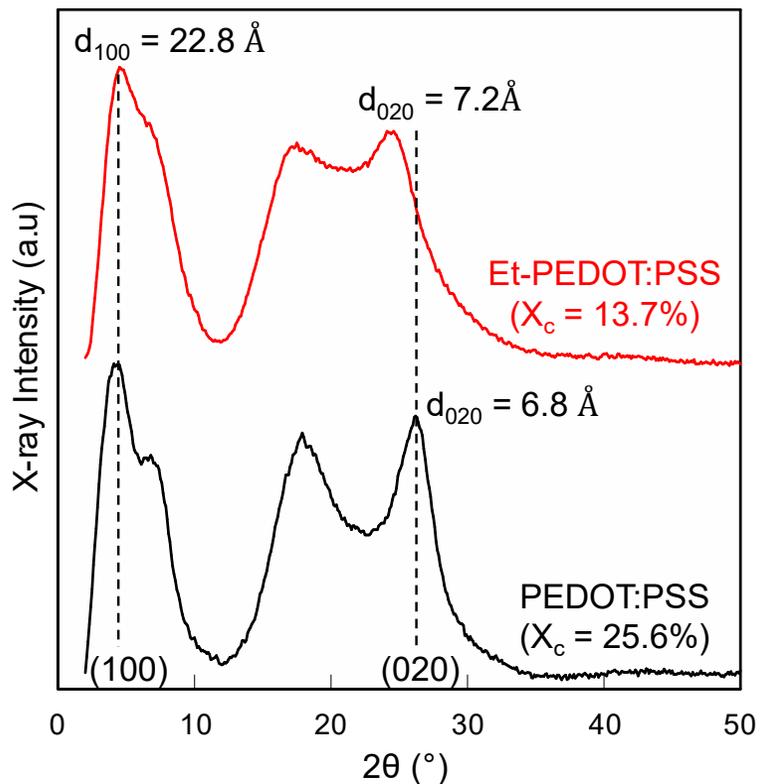


着眼点

PEDOT:PSSに側鎖を導入することで結晶化度を低下

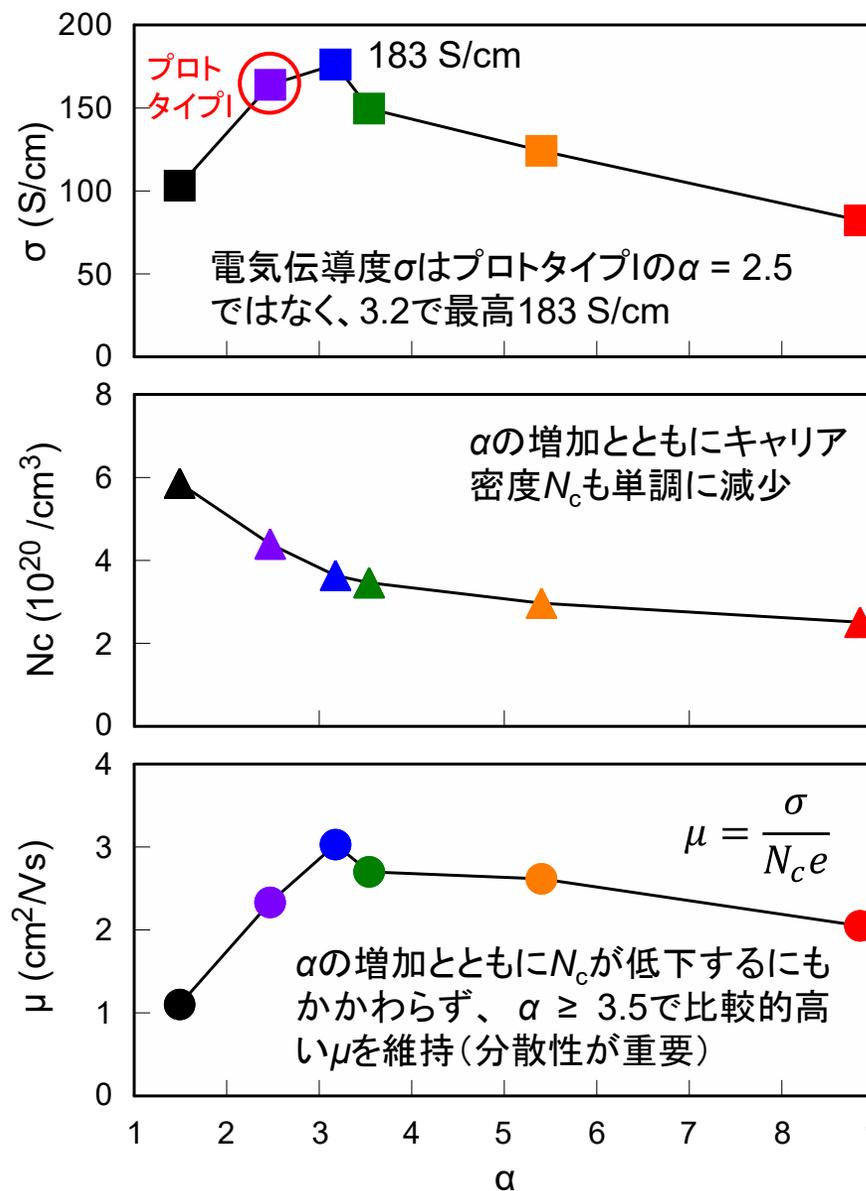
N_c と μ の両方を低下させることで絶縁化を促進

コンデンサの高耐電圧化



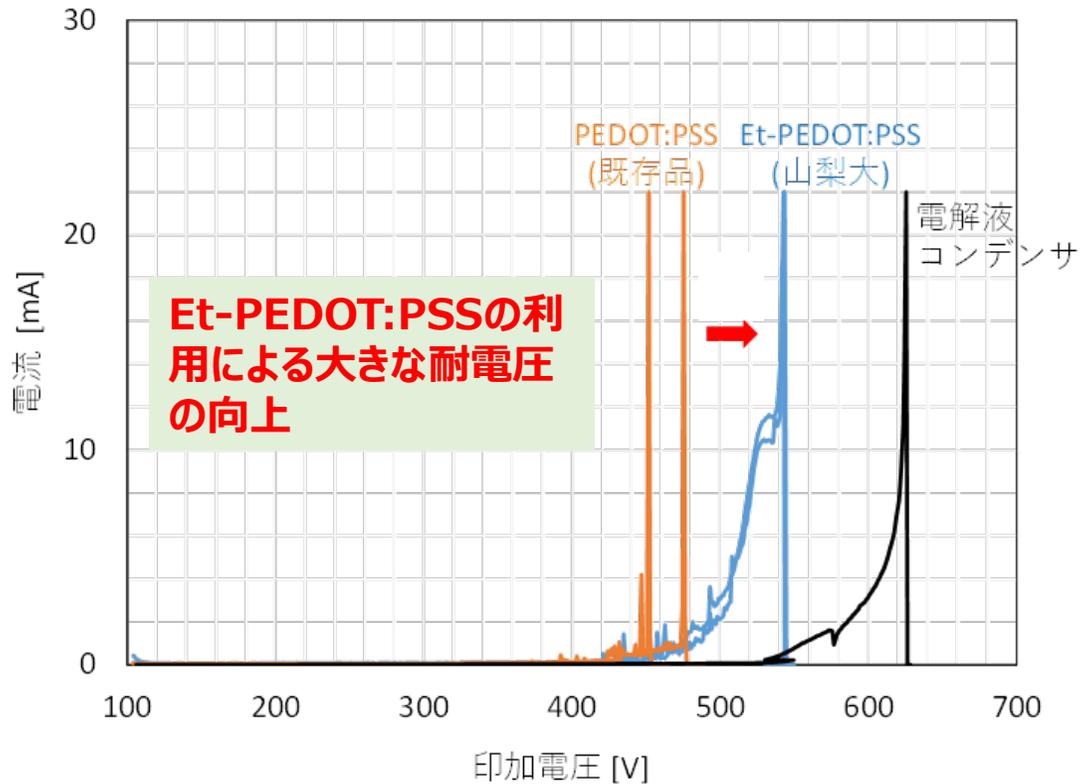
- PEDOT:PSSとEt-PEDOT:PSSは類似の結晶構造
- a軸方向の面間隔 (d_{100}) はPEDOTの側鎖に依存しない
- b軸方向の面間隔 (d_{020}) は側鎖の立体障害により広がり、**結晶化度 (X_c) も低下する**

Et-PEDOT:PSSの組成比(α)の影響

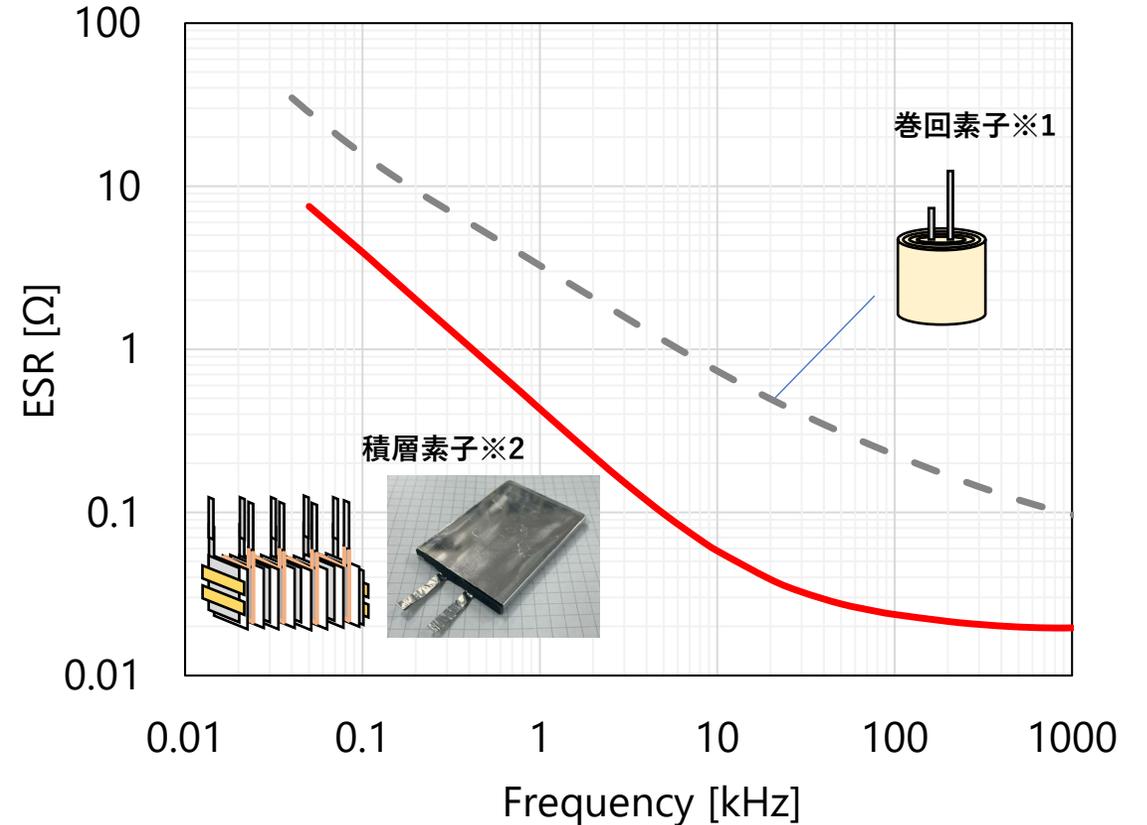


巻回素子と積層素子

巻回素子の耐電圧



ESRの比較

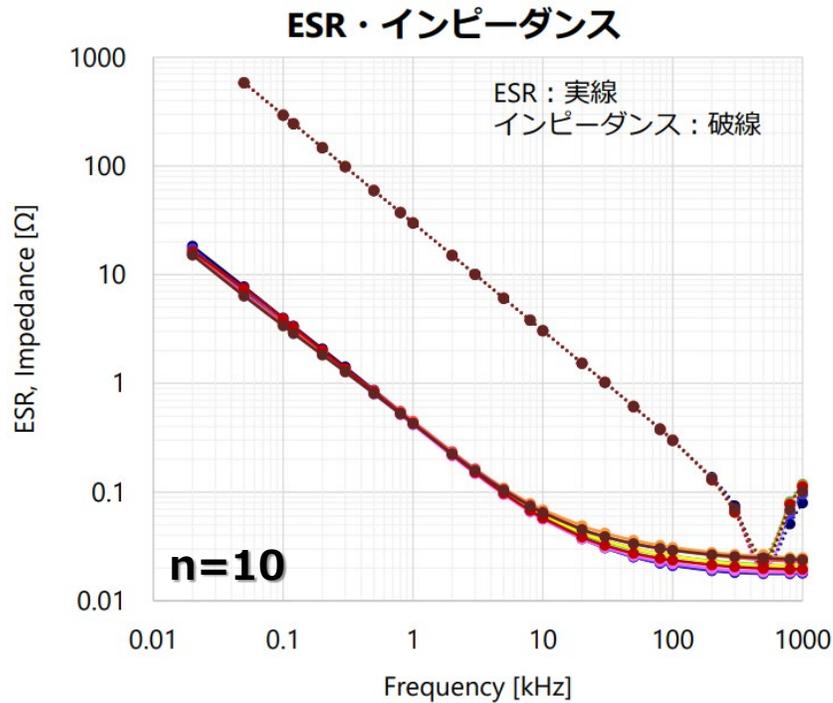


積層素子は、巻回素子に比べてESRが低下する大きなメリットがある。また、低背化も実現できるため、インバータの薄型化にもつながる可能性あり。

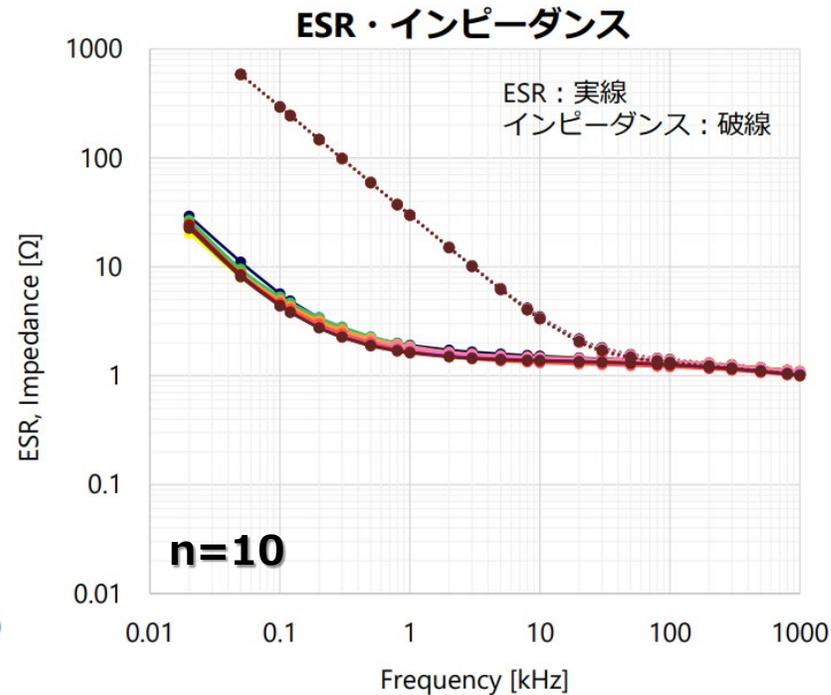
▶ **本PJでは積層素子を開発**

450V仕様プロトタイプI（積層タイプ）の特性

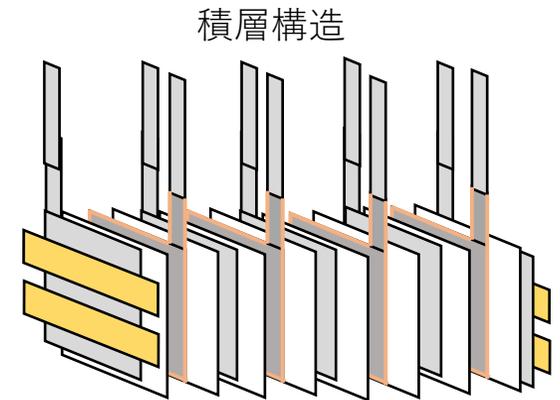
＜積層ポリマーコンデンサ＞



＜積層電解液コンデンサ＞

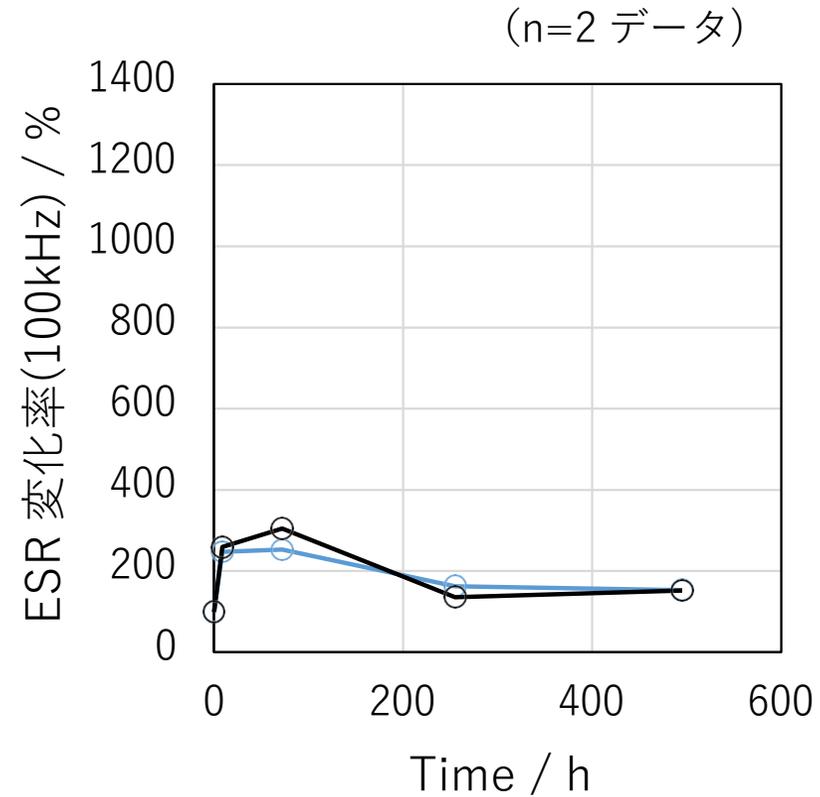
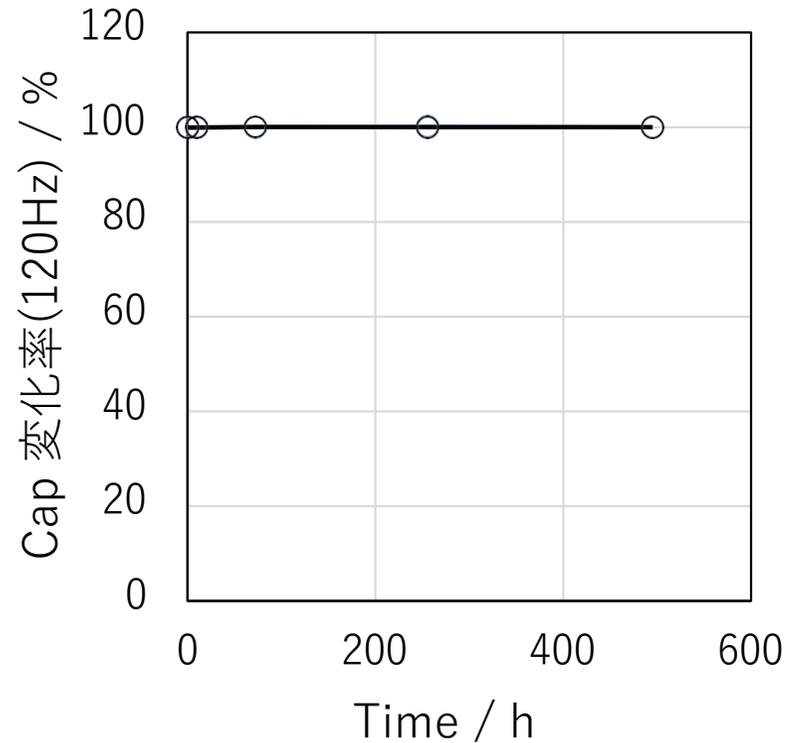


セル仕様：450 V / 5.4 μ F
 ポリマー：**Et-PEDOT:PSS** (山梨大合成)



- 電解液コンデンサ比で約1/30 のESR (100kHz)
- フィルムコン比60%以下の小型化目標 達成見込み (試算)

450V-125°C 負荷試験

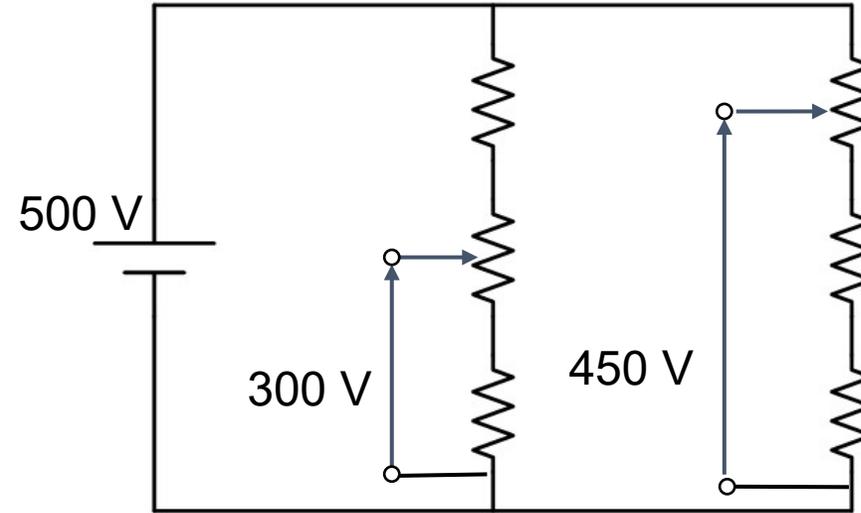


数百時間であるが、プロトタイプ I でも450V - 125°C で比較的良好な耐久性を確認

加速劣化試験



試験回路



分圧回路

試験方法

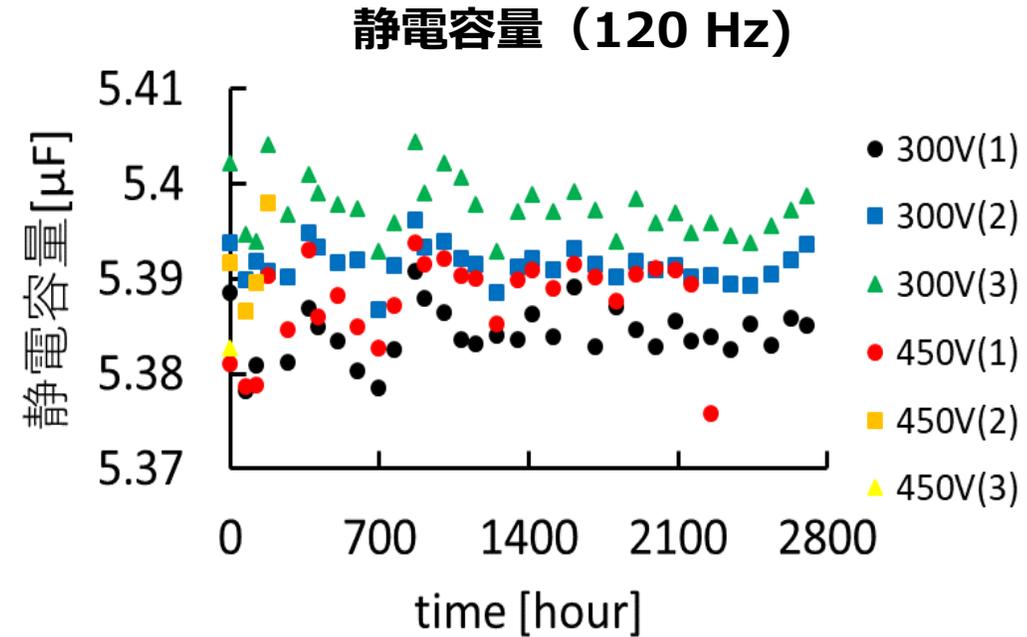
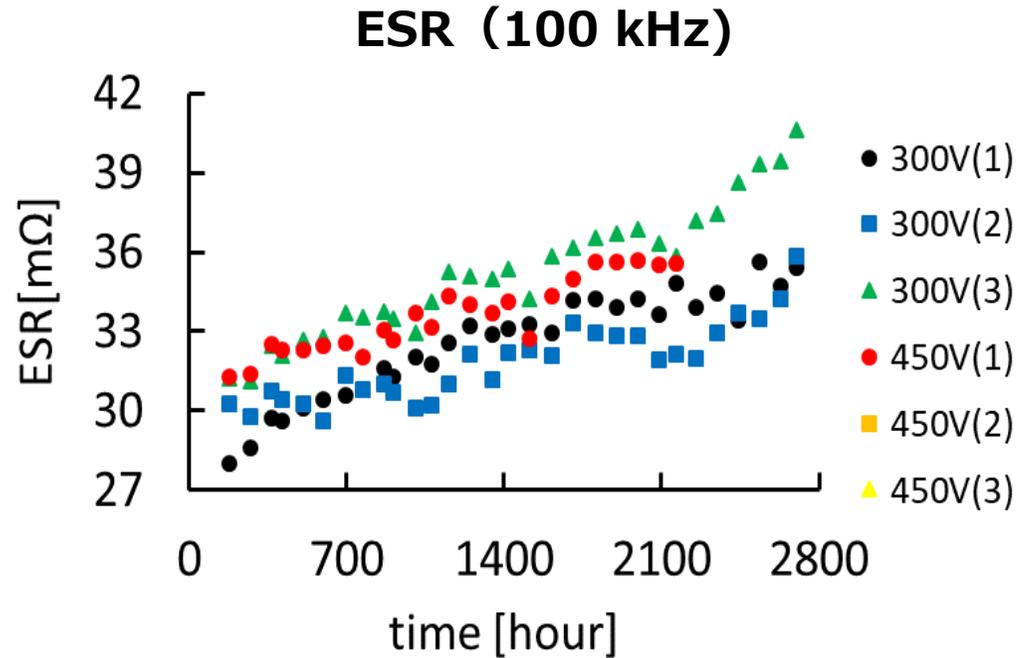
コンデンサを分圧回路に接続して,恒温槽に入れる

劣化試験条件

試験環境温度:125 °C

印加電圧:300 V, 450 V

加速劣化試験

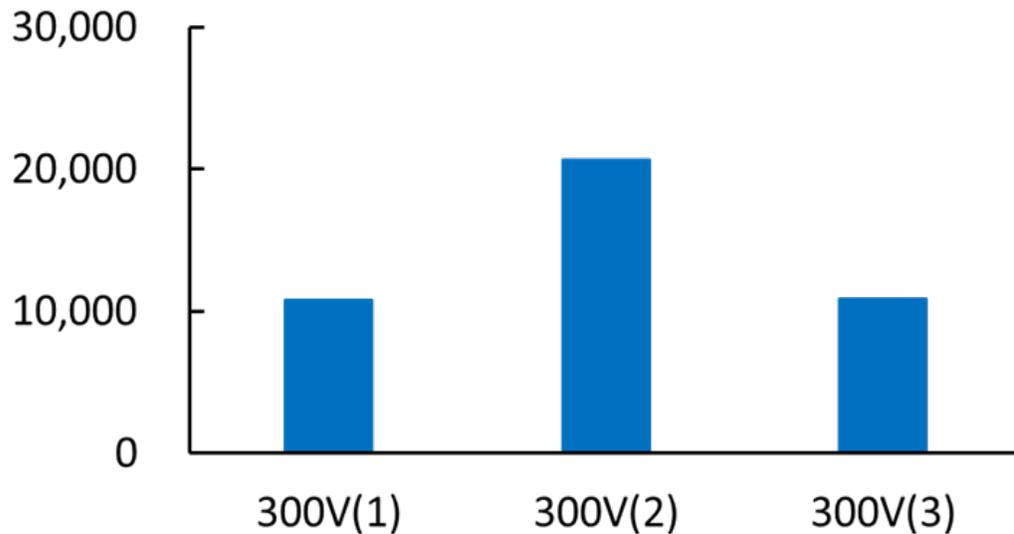


ESR → 試験時間に対して単調増加する傾向

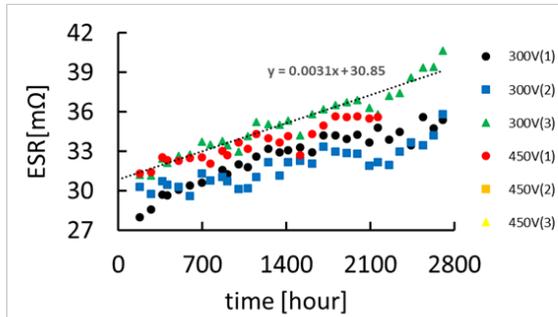
静電容量 → 劣化の傾向は確認できなかった

寿命推定

ESRの経時変化から算出した推定寿命



寿命推定の方法



ESRの経時変化のグラフから算出される線形近似を用いる

寿命の条件

ESRが初期値の2倍になる時間と定義する

市販の450 V仕様Al電解液コンデンサの寿命 (5,000 h)より長寿命

ESRが寿命指標 → コンディションモニタリング

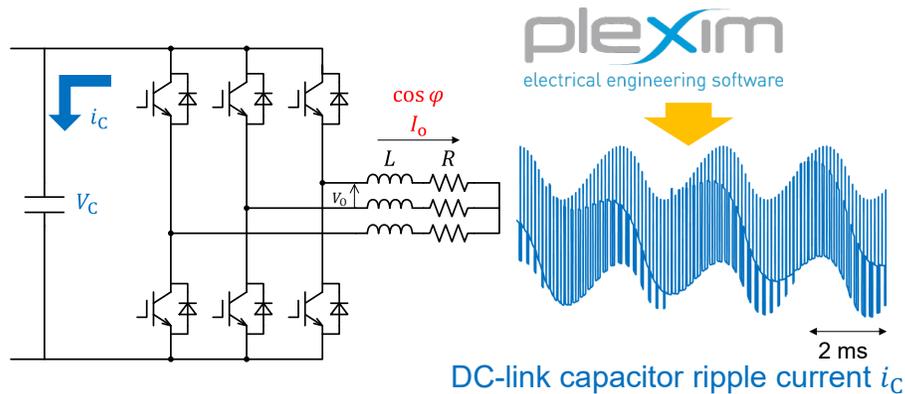
Digital Twinと小型マイコンを活用したESRモニタリングをこれまでに提案



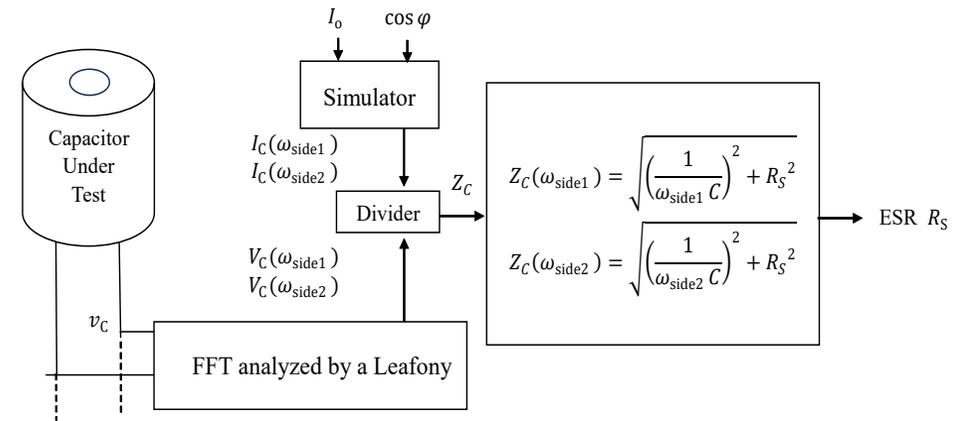
小型マイコン
STM32 MCU

450 V 高分子固体コンデンサへも適用可能

Digital Twin



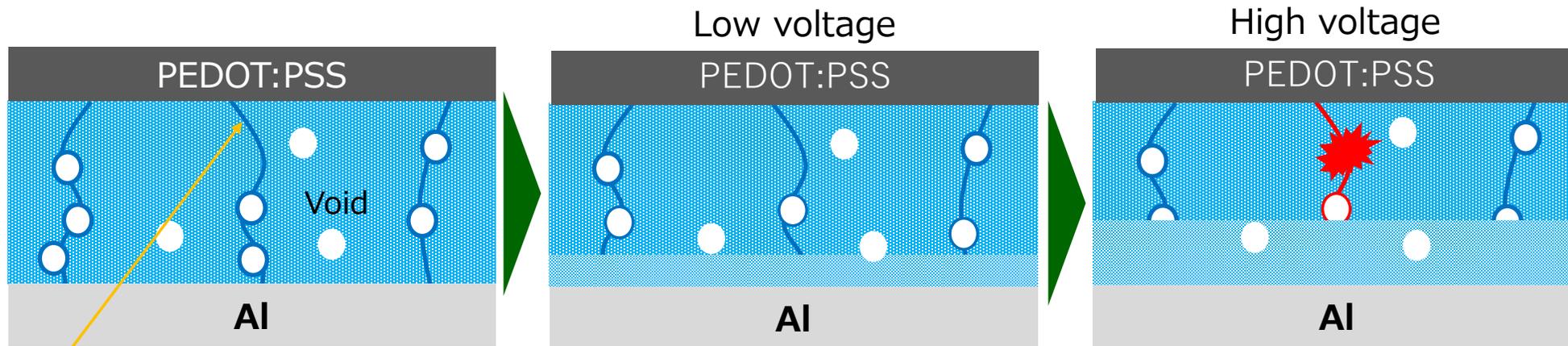
モニタリングブロック図



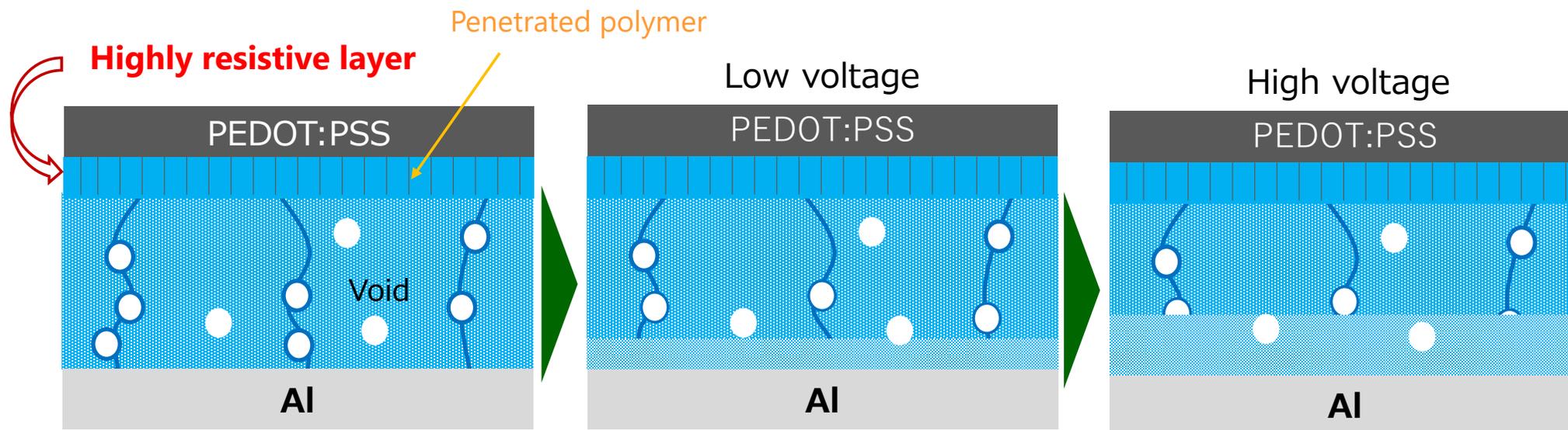
Y. Ogawa, T. Yamasoto, **K. Hasegawa,**

“Accurate ESR Monitoring of a DC-Link Capacitor with Switching Ripple Voltage by a Leafony”

Intl. Conf. Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 382, Nov. 2024.



Channel of water/polymer additive

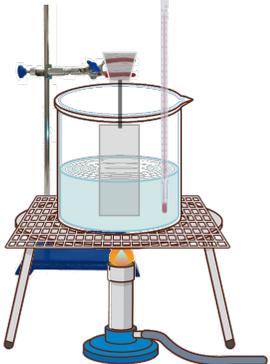


Highly resistive layer

Penetrated polymer

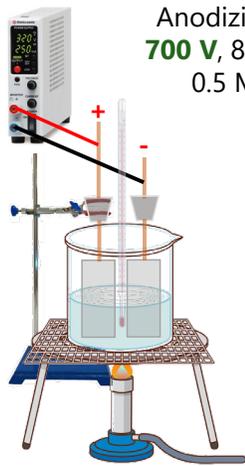
高抵抗層が局所的な電流上昇を抑制し、絶縁破壊電圧を向上させる。

Boiling water treatment
95 °C, 10 min
Deionized water



Pseudoboehmite ($\text{AlOOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$)
formation

Anodizing Process
700 V, 85 °C, 10 min
0.5 M H_3BO_3

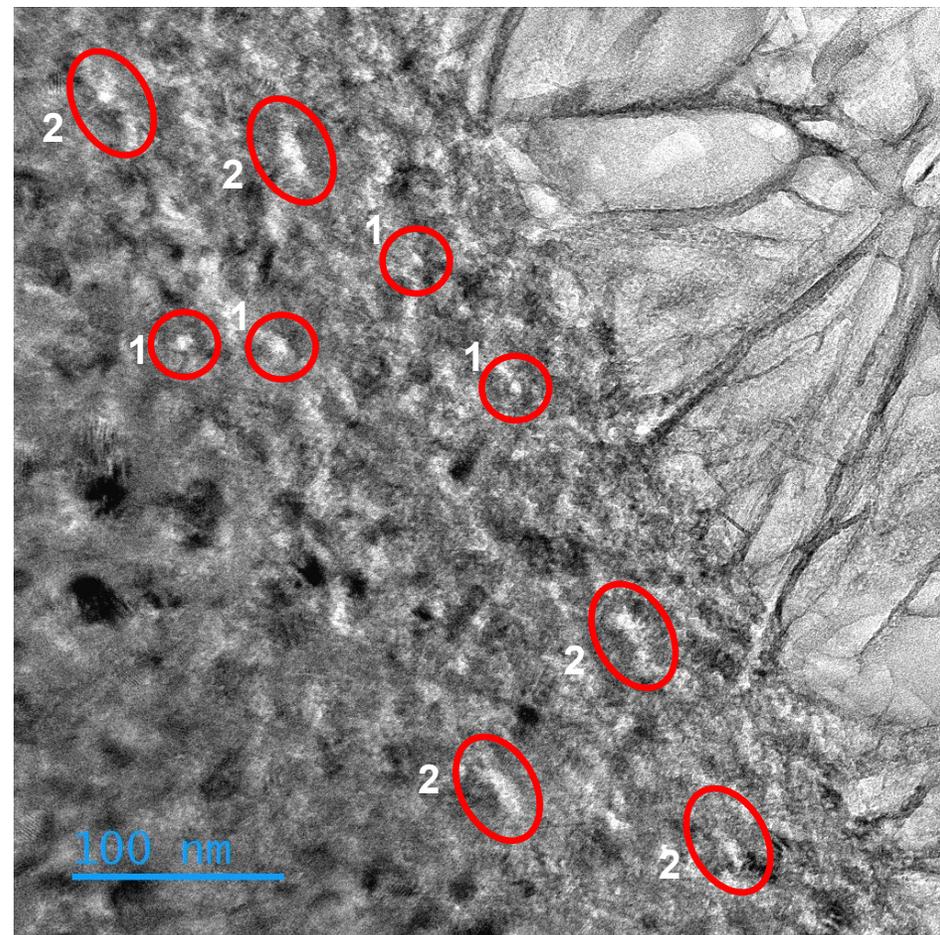


Anodic oxide formation
(γ' - Al_2O_3) **crystalline**

2nd Boiling water treatment
95 °C, 10 min
Deionized water

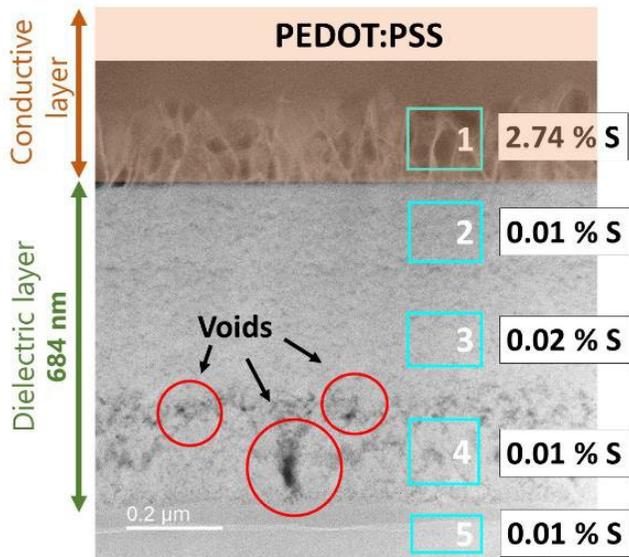


Controlling dielectric film
defects

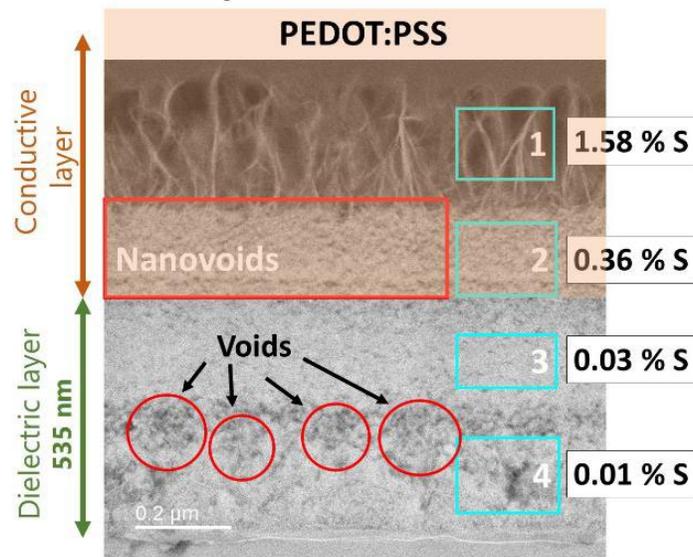


ナノボイド層（高抵抗層）を導入することにより、絶縁破壊電圧が200 V程度上昇

As-anodized

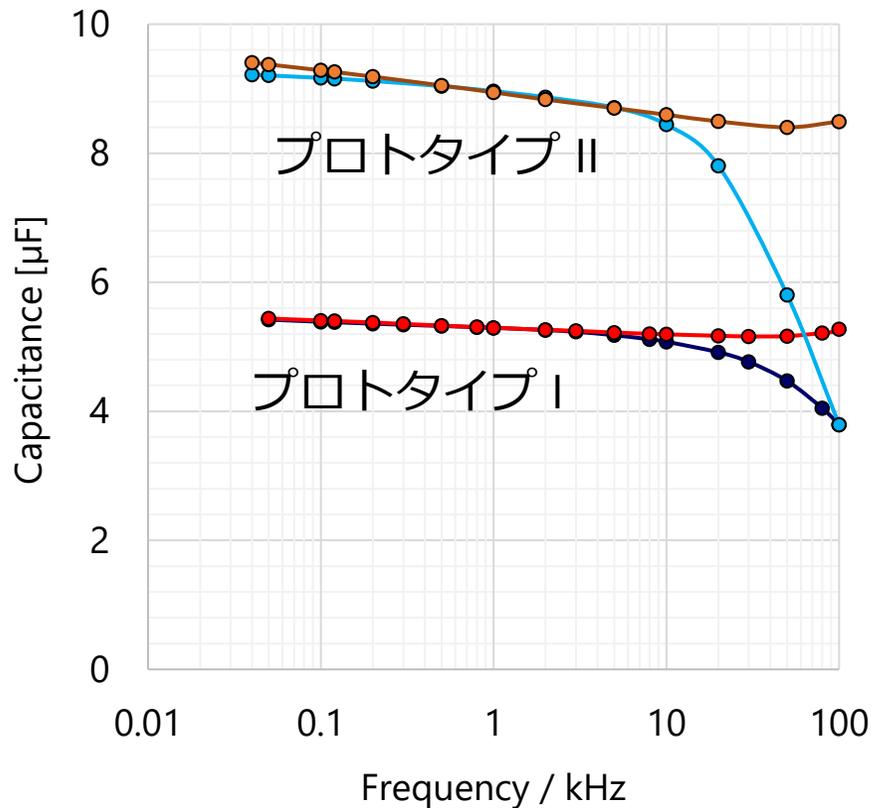


Post-hydration

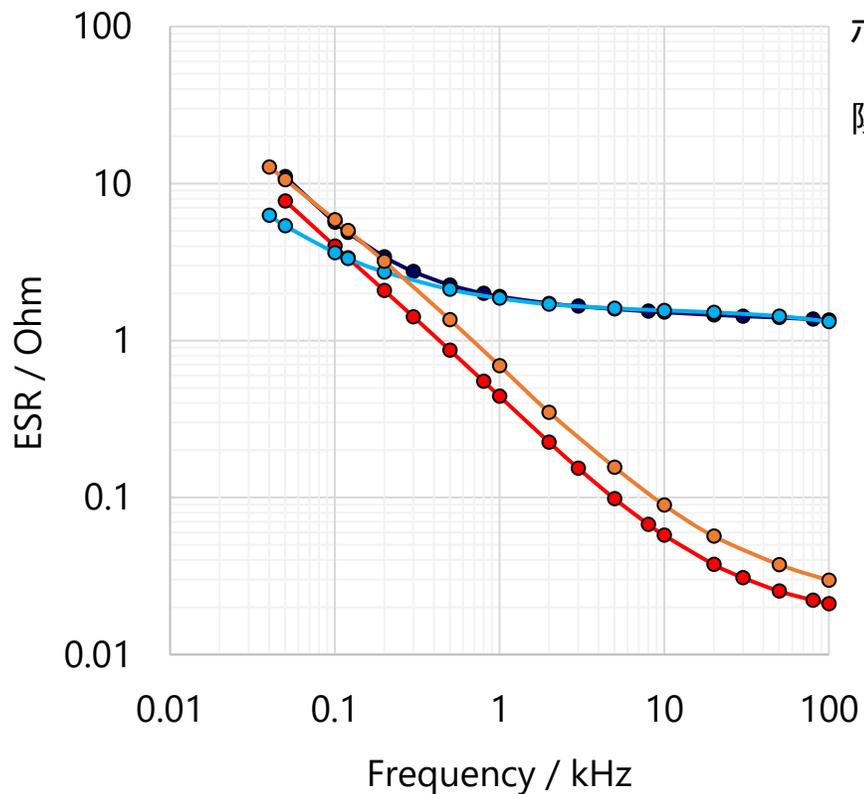


450V仕様プロトタイプII（積層タイプ）の特性

- プロトタイプII 電解液コン
- プロトタイプII ポリマーコン

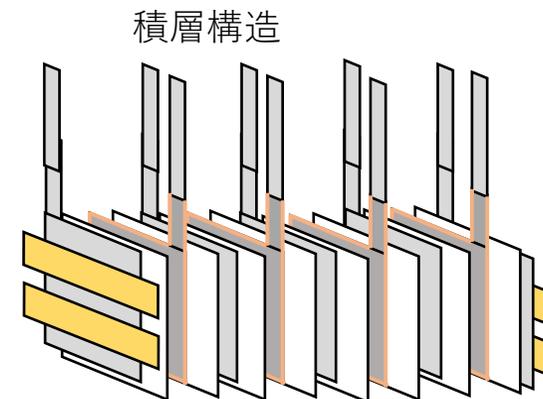


- プロトタイプI 電解液コン
- プロトタイプI ポリマーコン

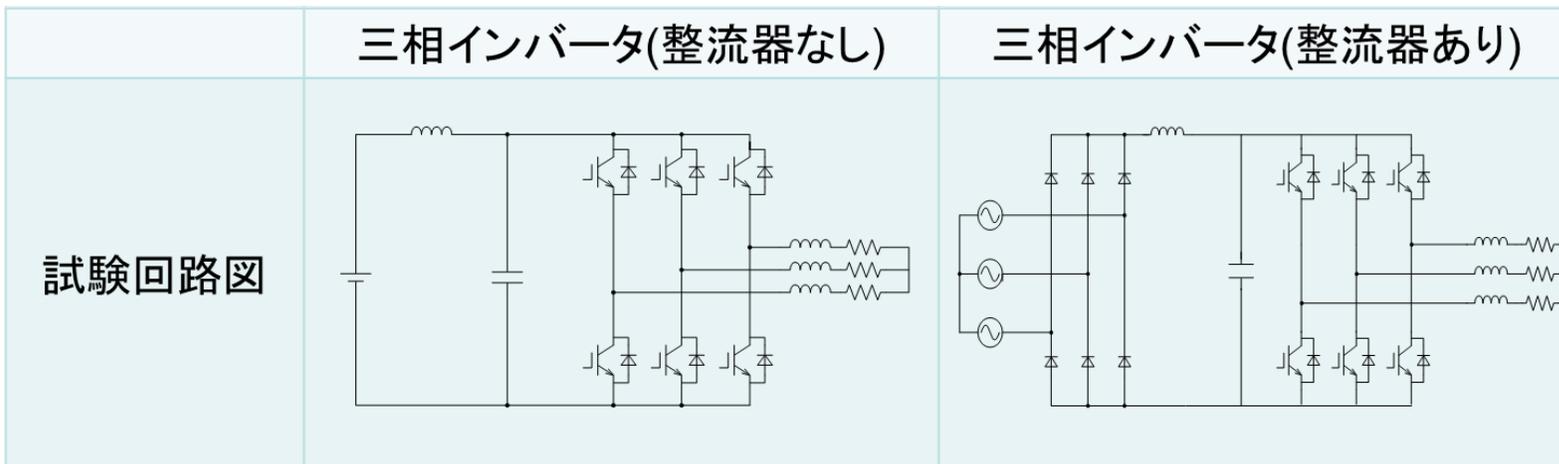


セル仕様：450 V / 5.4~8.6 μF
 ポリマー：Et-PEDOT:PSS (山梨大合成)

陽極箔：ナノボイド処理陽極



ナノボイド処理陽極を用いたプロトタイプIIは更なる高容量
 (耐電圧が向上するため誘電体厚みを薄くでき、高容量化)



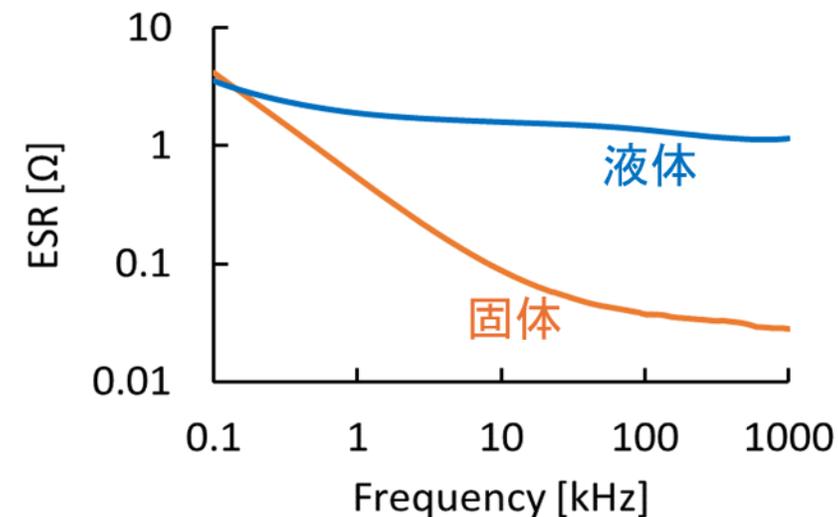
例) モータ駆動用インバータ
車載トラクションインバータ
産業用モータドライブ

一般電源用インバータ
系統連系インバータ
双方向電力変換器

損失測定方法

- DCリンクコンデンサの流入電流をログスキーで測定
- ESRの周波数特性とリップル電流から損失を導出

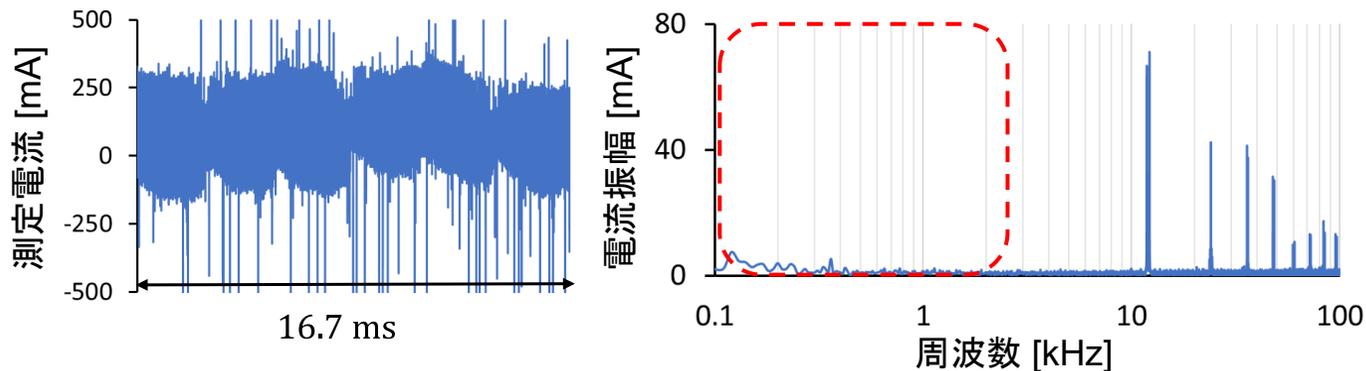
	固体コンデンサ	液体コンデンサ
メーカー	日本ケミコン(サンプル品)	日本ケミコン(サンプル品)
コンデンサ種	積層型ポリマーコンデンサ	積層型電解液コンデンサ
耐圧	450 Vdc	450 Vdc
静電容量	8.0 μ F	8.0 μ F



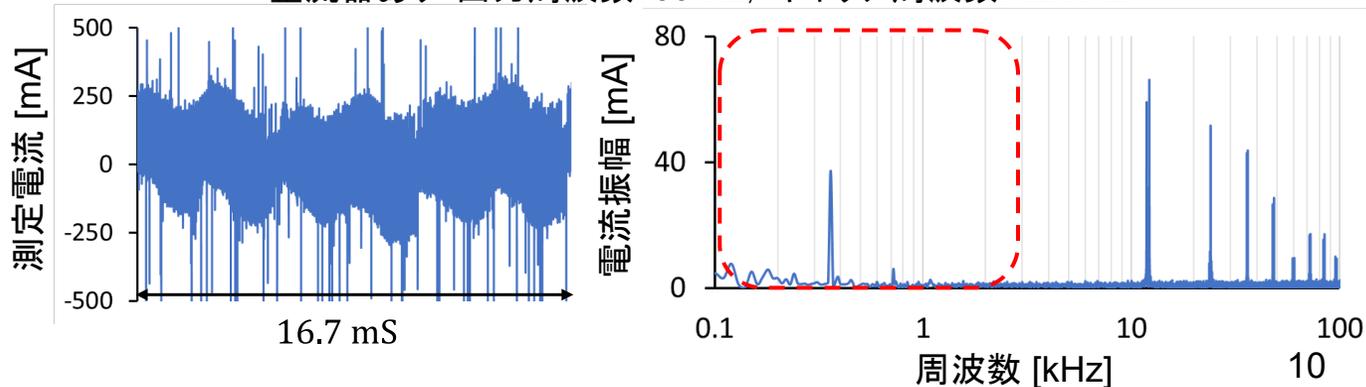
低周波帯： $ESR_{liquid} \cong ESR_{solid}$ 高周波帯： $ESR_{liquid} > ESR_{solid}$

コンデンサの流入電流

整流器なし 出力周波数: 60 Hz, キャリア周波数: 12 kHz



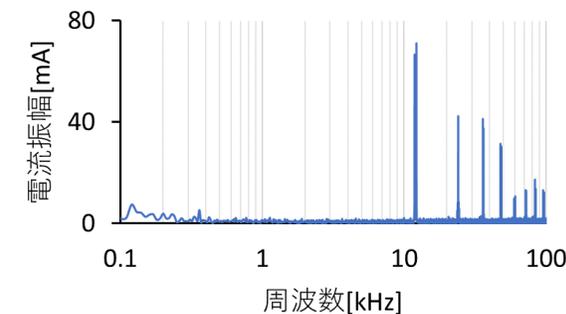
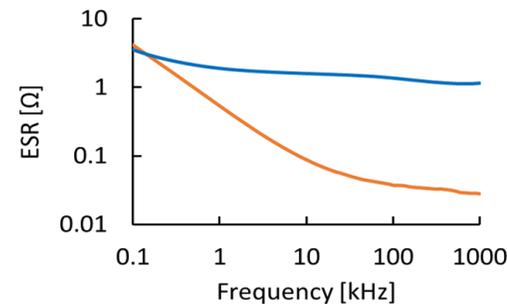
整流器あり 出力周波数: 60 Hz, キャリア周波数: 12 kHz



損失の導出方法

コンデンサのESR周波数特性

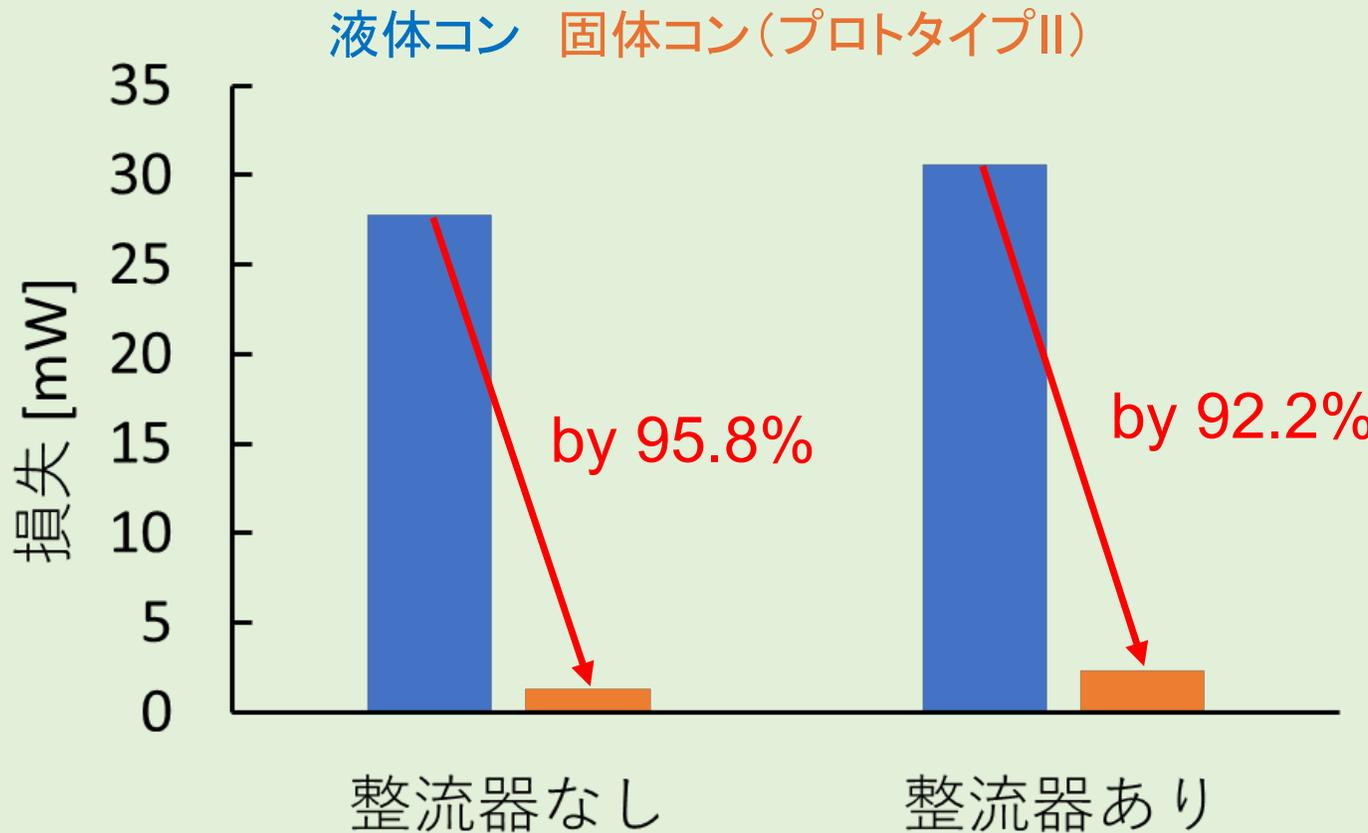
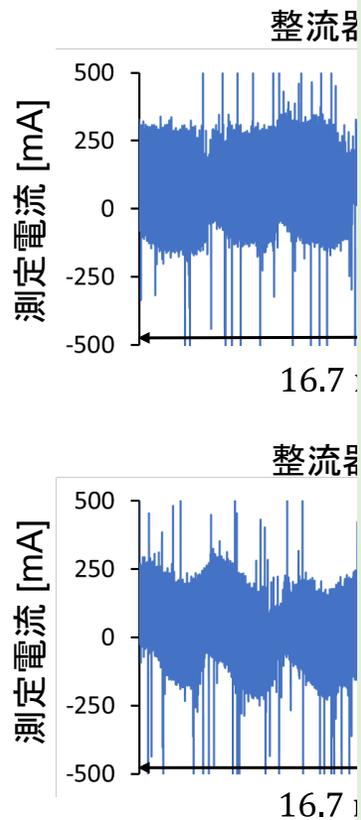
流入電流FFT解析結果



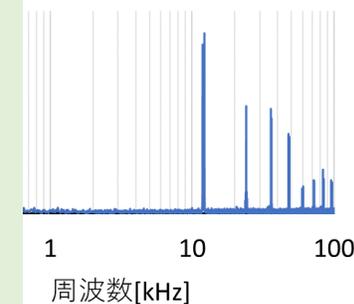
FFT解析より得られた電流振幅(I_{rsm})とESRの周波数特性測定結果から損失総量：
 $P = ESR \cdot I_{rsm}^2$ を導出

コンデンサの流入電流

損失の導出方法



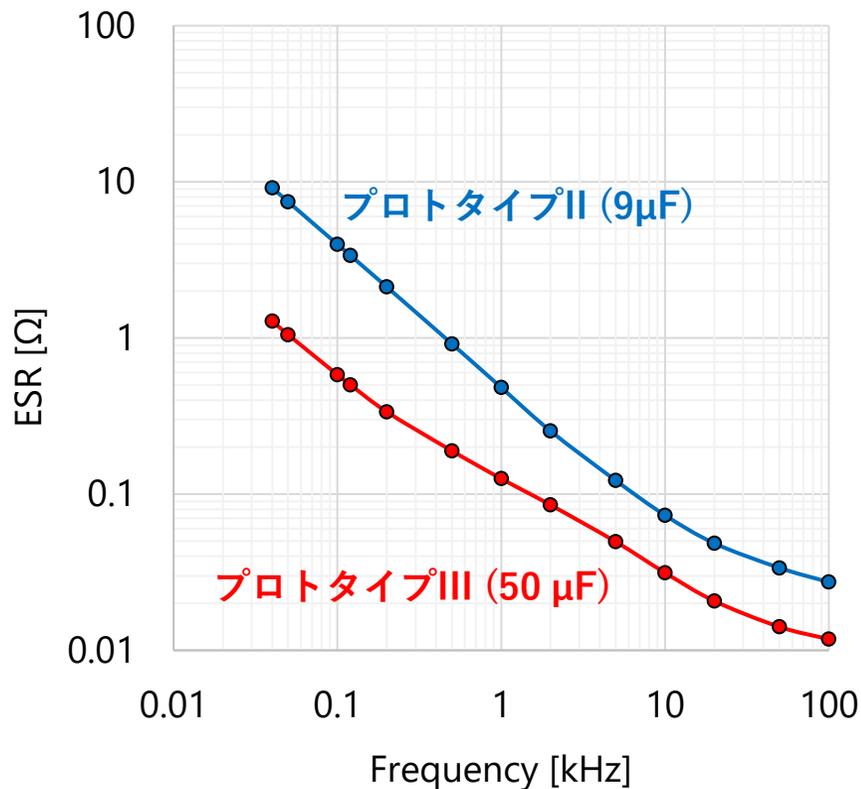
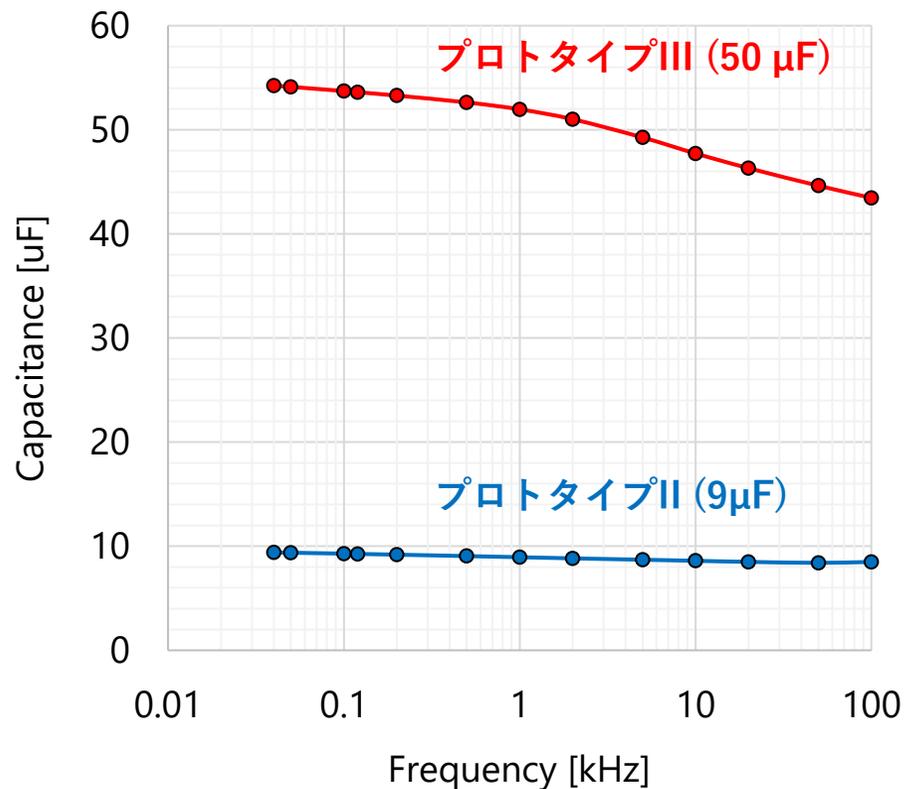
電流FFT解析結果



電流 (I_{rms}) とESR
損失総量：

液体コンデンサと比較して大幅な損失低減効果を確認

より確度の高いインバータ試験に向けて, 大容量試作品を検討中 (プロトタイプ III, ハンドメイド試作)



プロトタイプ III 外観



- ・ 現状 350 V 耐電圧を有する試作品が得られ, インバータ試験に向けて検討中

今後必要となる研究課題

- 450 Vをさらに上回る800-1000 Vの耐電圧を有する固体コンデンサの開発
- 巻回型素子への展開

