

題 目

高電圧ナノ秒パルスが拓く新技術 ー環境保全応用から絶縁材料評価までー



講義内容

研究概要・これまでの経緯

パルスパワーの定義と基礎理論

高電圧パルス放電を用いた排ガス処理

耐インバータサージ絶縁の信頼性

キーワード：高電圧パルス， 極性反転， 空間電荷，
ストリーマ放電， プラズマ化学反応

研究目的

技術革新で、経済発展と環境保全のジレンマ解決に寄与する



パルスプラズマを用いた省エネ型排ガス・排水処理

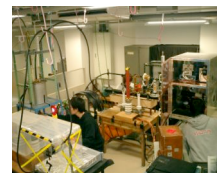
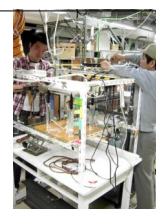
キーワード：高電圧ナノ秒パルス，非平衡プラズマ，
極性反転現象，ラジカル，ストリーマ放電

研究室紹介

固体および液体誘電体の絶縁破壊
機構解明と劣化診断に関する研究

パワーエレクトロニクスの電気
絶縁に関する信頼性技術
開発とその適用

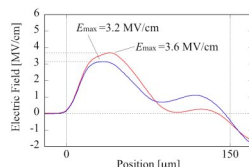
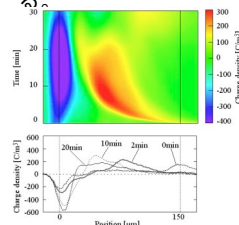
高電圧ナノ秒パルス放電を利用
した環境保全技術開発



研究背景

絶縁破壊の研究から環境保全応用へ

空間電荷の蓄積が、絶縁破壊現象を複雑にしている。



パルス静電応力法による測定結果の一例

ポリエチレン中の空間電荷分布（左）と電界分布（右）

- ・空間電荷が形成され始める前の短時間領域での現象に着目するため、高電圧ナノ秒パルスの発生技術が構築された。



ここから

- ・極性反転パルス放電の環境保全応用
- ・繰り返しインパルスによる絶縁劣化の研究

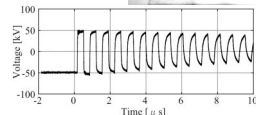
新技術誕生のきっかけ

昔（8年以上前）

電力用高電圧ケーブルの絶縁設計に関する研究をしていたときのこと

$-V_0$ で充電された同軸ケーブルの一端を直接接地すると、もう一端の電圧は、 $-V_0$ から $+V_0$ へ急激に反転する。

- 通常のインパルス試験よりも低い電圧で、ケーブルの部分放電劣化が引き起こされる。
- 見方を変えると・・・
- 低い電圧でも放電（衝突電離）してくれる。



排ガス処理に
利用したらいいんじゃない
かなあか・・・

パルスパワー（パルス電力）の定義

静電エネルギー、磁気エネルギーあるいは運動エネルギーなどの形で貯蔵されたエネルギーを時空間的に圧縮することにより得られる大電力のことを、総称してパルスパワーと言う。

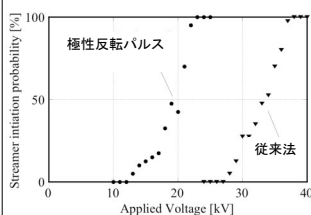
直流や交流と比べてパルスは省エネルギー

電圧を加え放し、電流を流し放しでは電気のムダ遣い

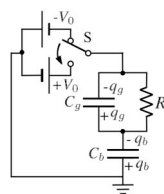
プラズマを形成するのに要する時間はたった 10^{-8} 秒

その時間だけ電圧を加えればよい → パルス放電

新技術の特徴・従来技術との比較



印加電圧と放電開始
確率の関係



極性反転時の反応器
の等価回路

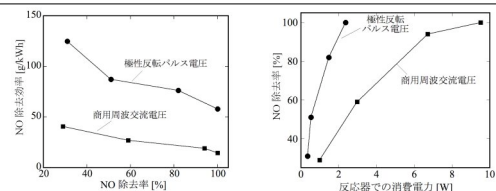
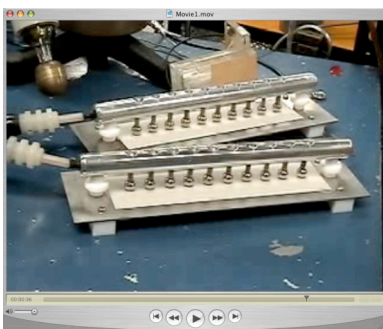


表1 近年、論文や大会にて発表された一酸化窒素(NO)除去性能の比較一覧

著者(所属)	論文誌	年	除去率と効率	初期濃度	触媒
江原由泰(武蔵工大)	電気学会論文誌	2003	60%で5g/kWh	1850ppm	なし
A. Khacef(フランス)	J. Phys. D: Appl. Phys.	2006	40%で11g/kWh	500ppm	なし
高木浩一(岩手大)	Int'l Cong. of Plasma Phys	2008	90%で5g/kWh	200ppm	なし
松本宇生(熊本大)	電気学会研究会資料	2008	90%で20g/kWh	200ppm	なし
門脇一則(愛媛大)	電気学会論文誌	2007	80%で40g/kWh	170ppm	なし
新本和也(愛媛大)	H20電気学会A部門大会	2008	80%で80g/kWh	170ppm	なし

ムービー1



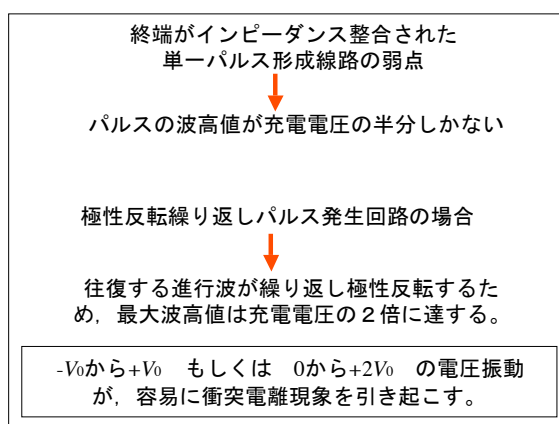
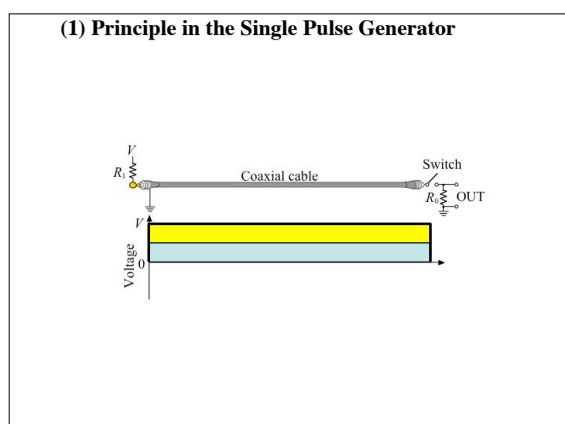
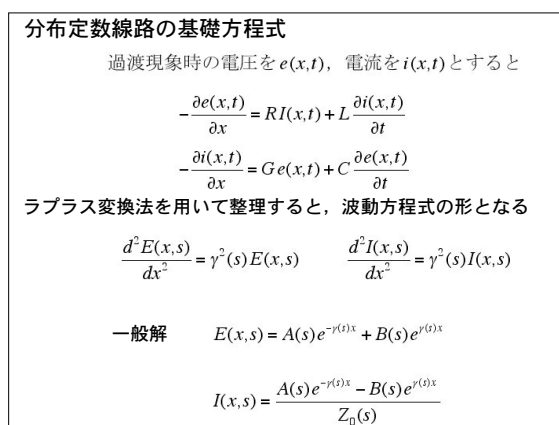
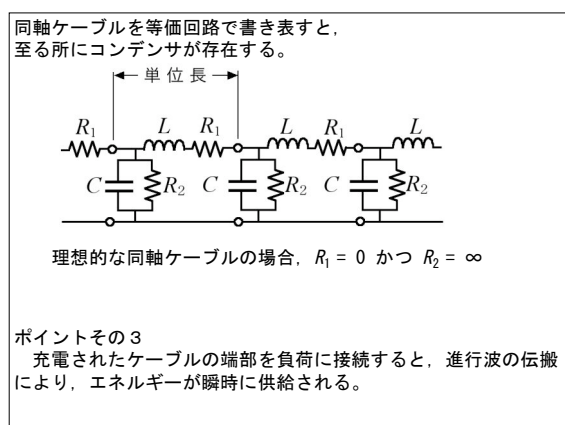
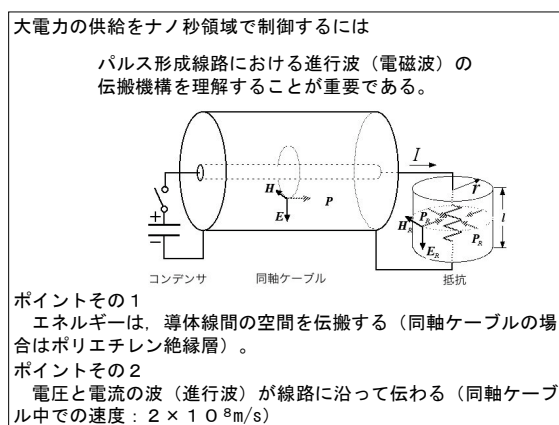
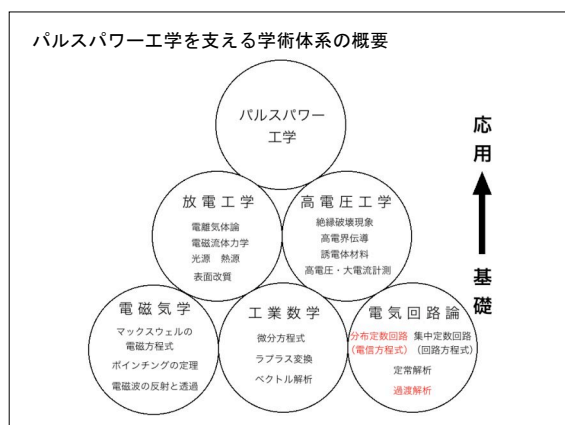
耐インバータサージ絶縁性能の評価

パルスパワー（パルス電力）の定義

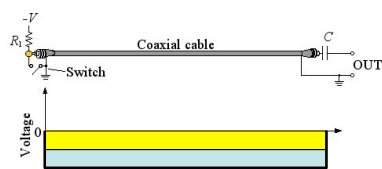
静電エネルギー、磁気エネルギーあるいは運動エネルギーなどの形で貯蔵されたエネルギーを時空間的に圧縮することにより得られる大電力のことを、総称してパルスパワーと言う。

ナノ秒パルスが拓く分野

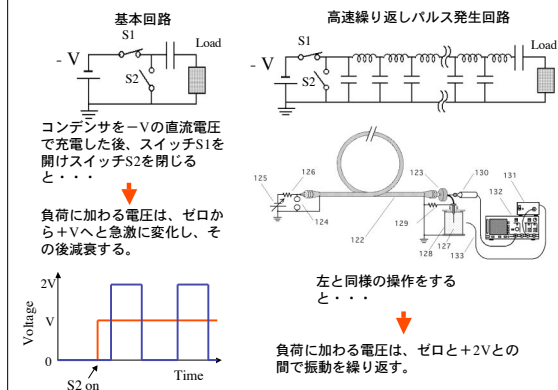
- 材料評価技術（パルス静電応力法、圧力波パルス検出法）
- 大気圧非平衡プラズマ応用（排ガス処理、水処理）
- 大電流放電応用（X線源、物体加速（レールガン））
- 光関連技術（光源開発、レーザ応用）
- 薄膜作成技術（パルスイオンビーム蒸着法）



(2) Principle in the Reciprocal Pulse Generator



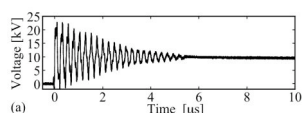
パルス電圧の発生原理



実際の波形（充電電圧は全て -10kV ）

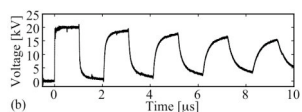
ケーブル長10m

直接接地方式



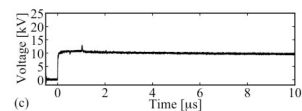
ケーブル長100m

直接接地方式



ケーブル長100m

整合抵抗を介して接地



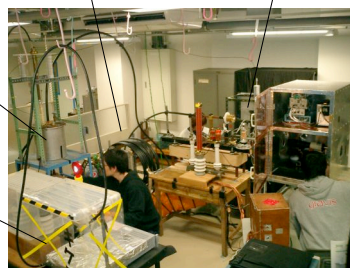
初期の極性反転パルス発生装置（～H15年）

パルス形成線路（全長35m）

反応器

スイッチ

直流電源



繰り返しパルス電圧発生装置の開発



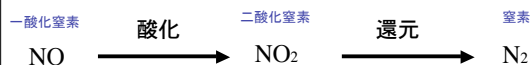
16年度試作品：
回転ギャップスイッチ方式



17年度試作品：
半導体スイッチ方式

ディーゼルエンジン、工場あるいは発電所からの排ガス中に含まれる窒素酸化物(NOx)の処理に放電を利用する研究が盛んに行われている。

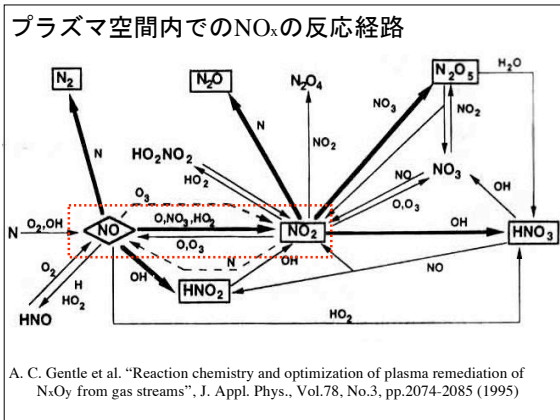
処理の流れ



プラズマ化学反応

- ・オゾン暴露
- ・電子ビーム照射
- ・交流バリア放電
- ・パルス放電

NO_2 触媒による反応や、還元剤(Na_2SO_4)との反応

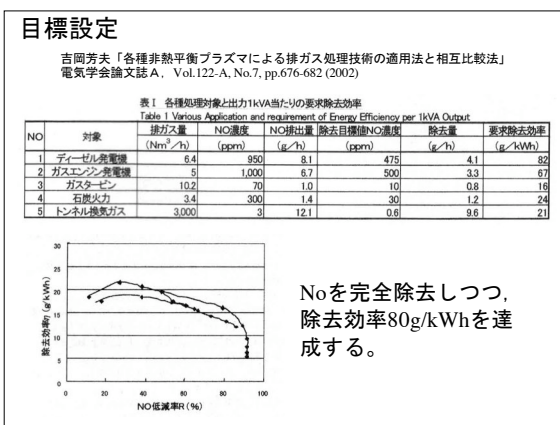


ストリーマ放電の特徴

その先端に10eV程度の高エネルギー電子を多く有する。
↓
解離反応により、酸素ラジカルなどの活性種を生成する。

電圧印加を短時間で休止すれば、電子温度のみが高くなり
分子温度は低いまま → **非平衡プラズマ**

エネルギー効率の向上が期待できる。



Experimental Procedure

Barrier-type cylindrical reactor

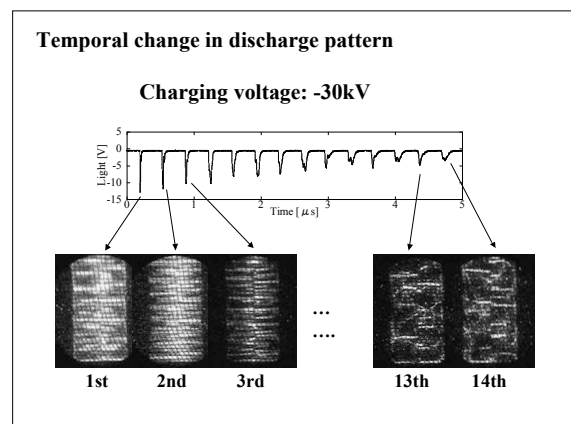
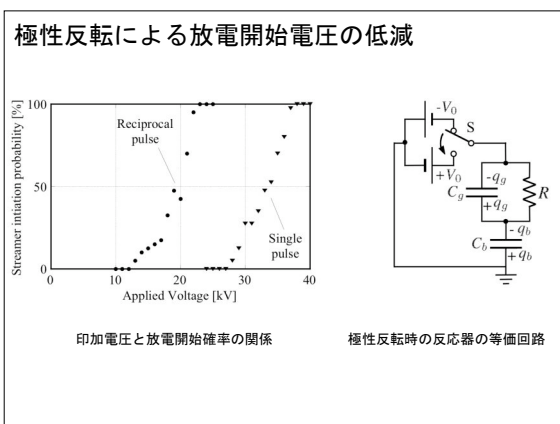
- Tungsten wire
- Grass cylinder
- Copper mesh
- Silicone oil

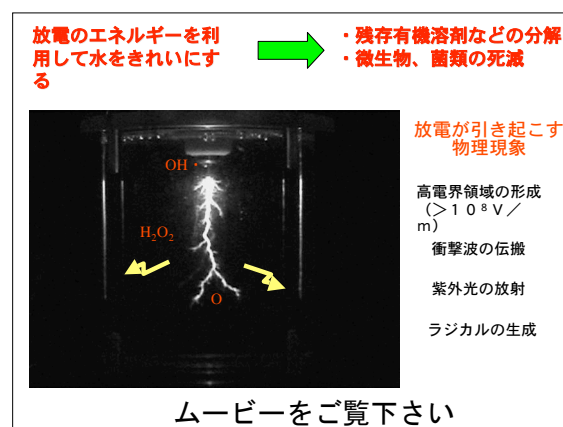
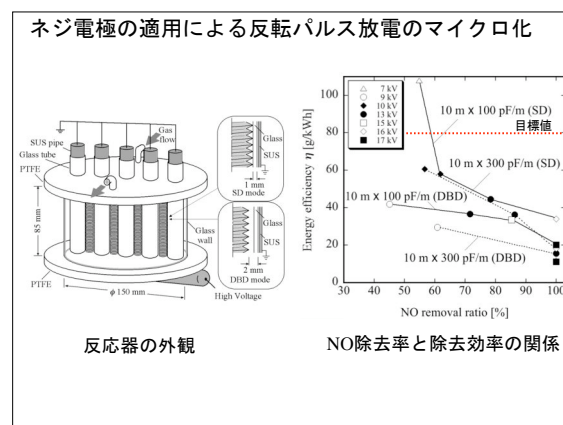
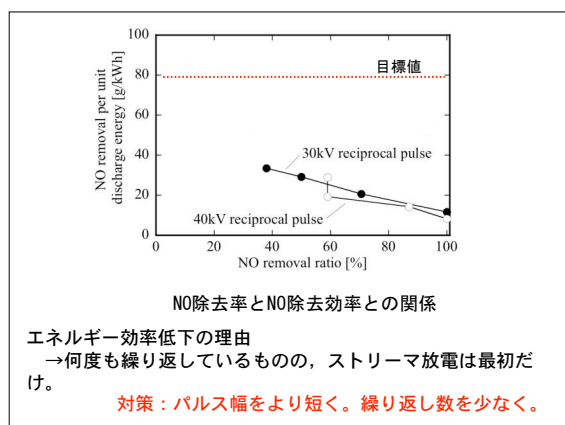
Coaxial cable (35m)

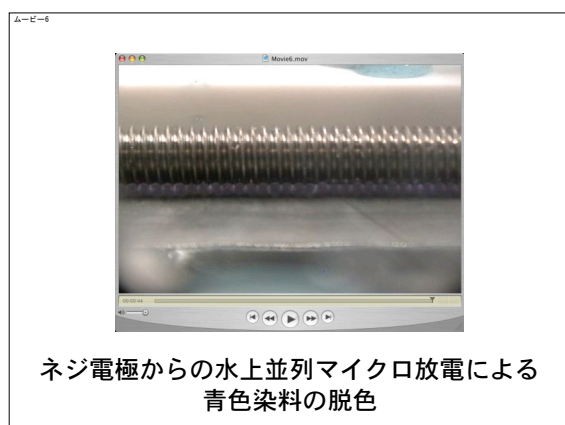
Gas in
Flow rate 1.0 – 6.0 l/min

Components
NO 170ppm
O₂ 15vol%
N₂ 85vol%

Gas out







極性反転パルス電源を用いた耐インバータ
絶縁性能評価システムの構築と適用

キーワード: 矩形波パルス, PWM制御, インバータサージ, 絶縁劣化, 部分放電

愛媛大学の電気自動車

サージ: 津波のような破壊力のある突然やってくる大波
電気工学の分野では「インパルス」

雷サージ: 雷電流による誘導起電力 ($-L \frac{di}{dt}$)
発生頻度 10^4 から 10^6 回/年

インバータサージ: 高速スイッチングによるパワー素子の
制御時 (PWM方式など) に生ずる

ハイブリッドカーに限らず多くの機器で問題となっている。
発生頻度 10^9 から 10^{11} 回/年

出典: 森他, 電気学会研究会資料0E1-98-29 (1998) 出典: 土屋他, 電気学会研究会資料0E1-98-29 (1998)

ハイブリッドカーや電気自動車に用いられるインバータ駆動モータの場合、インバータサージと呼ばれる急峻なパルス電圧が高頻度で発生する。このような状況下を想定した絶縁試験規格は無い。

IEC(国際電気標準会議)においてヨーロッパ各国の専門家や企業により規格化が進行中。

電気学会でも調査専門委員会が発足
H21年度に、第一次共同実験がスタート

従来技術とその問題点

6研究機関による第一次共同実験でわかったこと

- ・インバータサージは極性反転パルス電圧とそっくり。
- ・部分放電現象を統計的に調べるには、特殊な電源、高価なオシロスコープとセンサが必要。しかも作業に手間がかかる。



うちの極性反転パルス電源を
PC制御できるようにして、センサと
組み合わせれば、安価でラクな
評価装置ができるぞな……

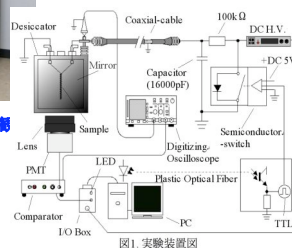
繰り返しパルス印加時の部分放電検出システムの構築



放電光カウンティングシステムとの組み合わせにより、部分放電開始電圧の自動測定を実現した。

PC制御型極性反転パルス電源の外観

- ・ 発明の名称 部分放電回数測定装置
- ・ 出願番号 特開2009-053036
- ・ 出願人 愛媛大学
- ・ 発明者 門脇一則、西本 榮



実験結果の一例

個々のプロットは
100個の測定データ
の平均値である

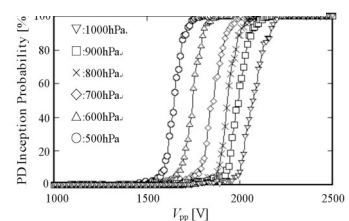


図2 様々な気圧下でのサージ電圧 V_{pp} と放電確率の関係

大量の部分放電データの統計処理を自動計算できる

繰り返しインパルスにおける 絶縁寿命特性と 劣化メカニズムについて

この分野で研究されていること

1. 絶縁劣化メカニズム
 - 複合ストレス劣化のモデリング
 - 誘電損失による劣化
 - 空間電荷蓄積による劣化
2. 部分放電の進展と絶縁破壊
 - 部分放電光およびその発生頻度の時間推移
 - 部分放電の進展による劣化プロセス
3. $V-t$ 特性、 $V-n$ 特性
 - 周波数加速性と $V-t$ 特性
 - 正弦波電圧との比較
 - $V-n$ 特性とPD発生頻度を考慮した $V-t$ 特性

1. 絶縁劣化メカニズム

絶縁劣化の加速要因

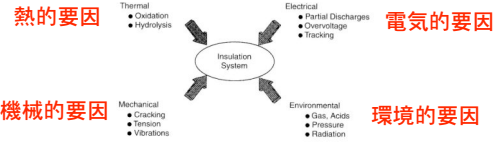
- ・ 誘電損失による熱劣化
- ・ 空間電荷蓄積による絶縁劣化
- ・ 部分放電の進展による表面劣化

➡ 単一ストレスによる劣化はむしろ稀

モータ巻き線の場合

電気と熱による複合ストレス劣化のモデリング

一般的な絶縁劣化要因とそのモデリング



単一ストレスモデル 指数関数則

$$L = A \exp(B/T)$$

$$L = a \exp(-bE)$$

逆n乗則

$$L = k E^{-n}$$

複合ストレスモデル

Simoni's model

Fallow's model

Crine's model

Ramu's model

A.C.Gjaerde: "Multifactor Ageing Models- Origin and Similarities", IEEE Elect. Insul. Magazine, 13, 1, pp.6-13 (1997)

Fallow's model 指数関数同士の組み合わせ (半経験的)

$$L(V, T) = \exp\left(A(V) + \frac{B(T)}{T}\right) \quad (1)$$

$$A(V) = A_1 + A_2 V \quad (2)$$

$$B(T) = B_1 + B_2 T \quad (3)$$

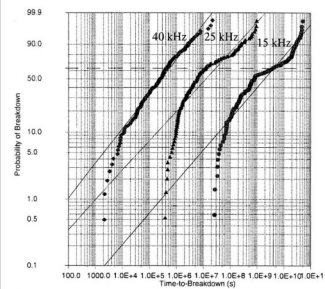
$$A_1, A_2, B_1, B_2 : \text{const.}$$

Ramu's model 指数関数とn乗則の組み合わせ (半経験的)

$$L(T, E) = c(T) E^{-n(T)} \exp\left[-B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (4)$$

繰り返しインパルス印加時の複合劣化モデルの提案

E.A.Feilat, S.Grzybowski and P.Knight: "Multipulse Stress Aging of Magnet Wire by High Frequency Voltage Pulses and High Temperatures", Conf.Rec. of IEEE Int'l. Symp. on Elect. Insul., pp.157-160 (2000)



破壊するまでの印加回数が周波数に大きく依存している理由

電気的ストレスと誘電損失による熱的ストレスの相乗効果

ツイストペアサンプルの破壊遅れ時間のワイブル分布
繰り返し周波数 $f=15\text{kHz}, 25\text{kHz}, 40\text{kHz}$, $V=700\text{V}$, $T=155^\circ\text{C}$

ワイブル分布における確率分布関数 $f(t)$ と信頼度関数 $F(t)$

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right] \quad F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right]$$

位置パラメータ γ 形状パラメータ m
尺度パラメータ η

尺度パラメータ η に、式(1)から求めた平均寿命 $L(V, T)$ を代入して、各周波数における V - t 特性を解析的に求めている。

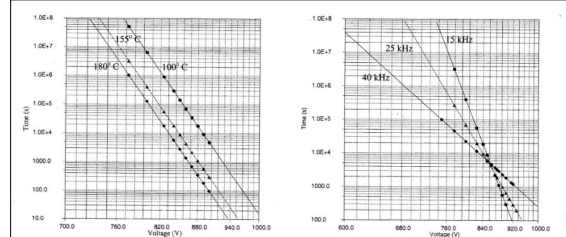
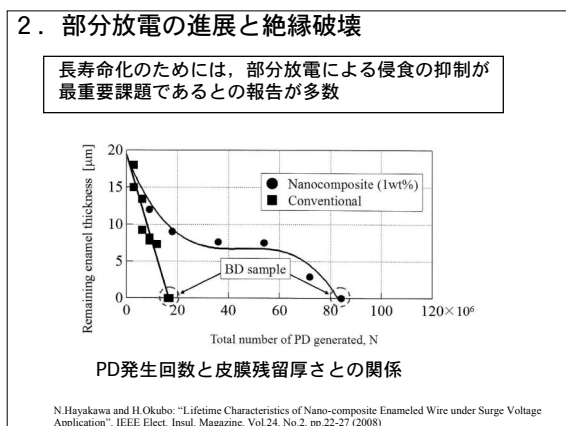
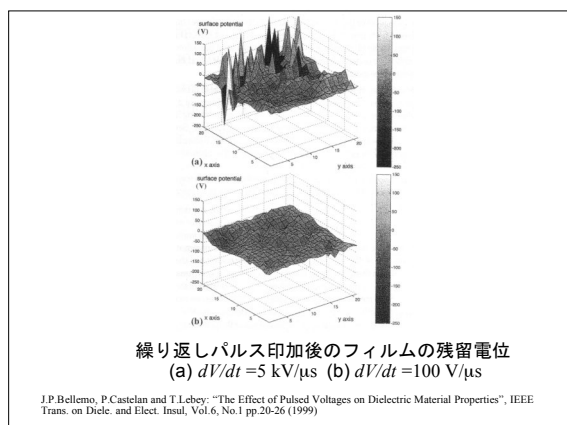
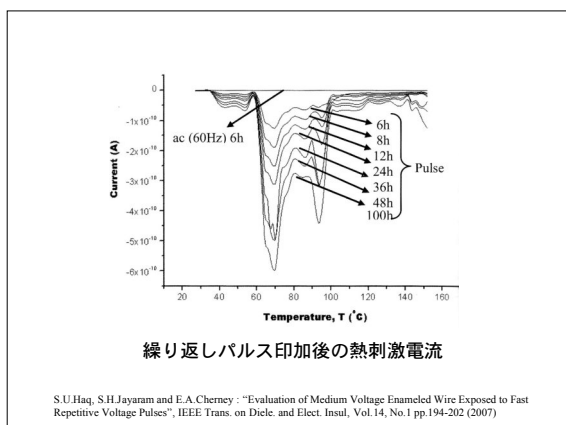
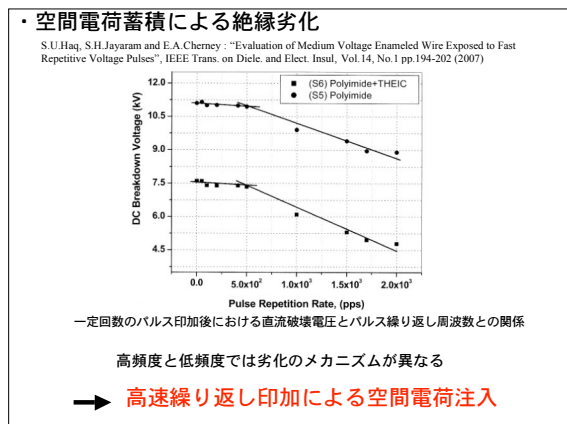
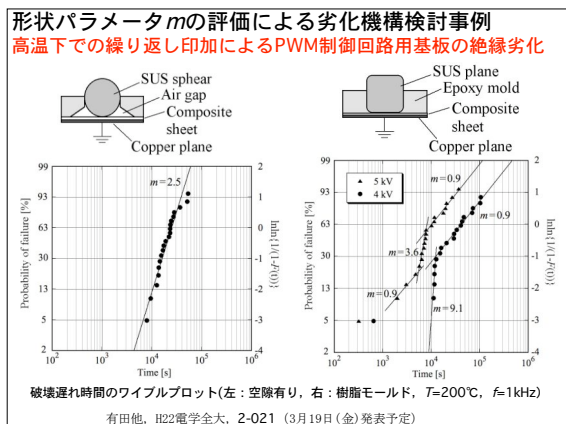


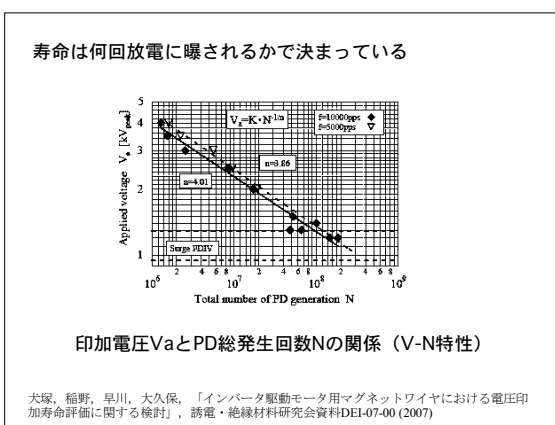
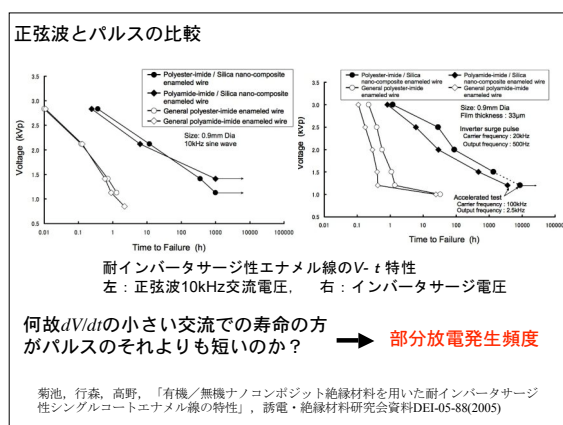
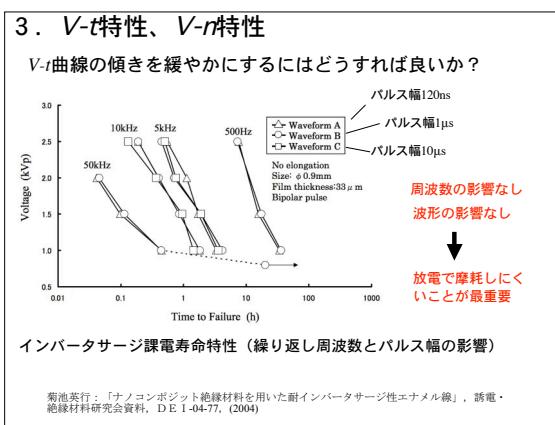
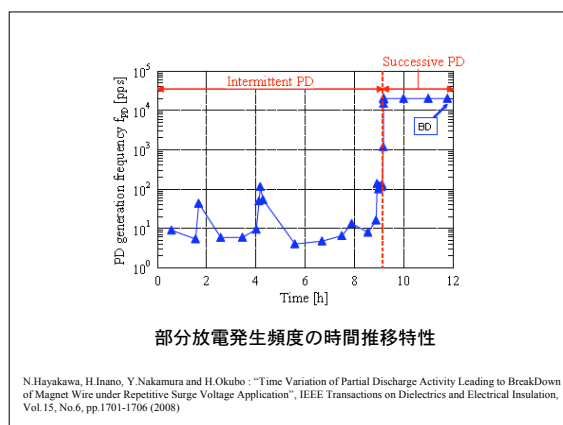
Figure 5: V-t characteristic at 100, 155 and 180°C and at 15 kHz Figure 6: V-t characteristic at 15, 25, and 40 kHz and at 155°C

n 値は周囲温度に依存しないのに、パルス繰り返し周波数に大きく依存。
最近の 5 年間は、周波数自身を劣化要因としたモデリングへ

$$L(V, T, f) = K f^{\left(m_1 + \frac{m_2}{V}\right)} \exp\left(\frac{A}{V} + \frac{B}{T}\right) \quad (5)$$

$$m_1, m_2, A, B : \text{const.}$$





まとめ

1. 絶縁劣化メカニズム
 - 誘電損失による熱劣化
 - 空間電荷蓄積による絶縁劣化
 - 放電による摩耗劣化
 - 複合ストレス劣化の忠実なモデリング
2. 部分放電の進展と絶縁破壊
 - 発生頻度の推移→間欠-連続-臨界
 - 部分放電の進展による絶縁層の減肉が劣化の主要因
3. V-t特性、V-n特性
 - 放電により摩耗しにくい材料開発の重要性が示唆される。
 - ナノコンボジット化による耐サージ電線
 - PD発生頻度を考慮したV-n特性から, 寿命は放電発生頻度に強く依存していることがわかる。

おわりに

愛媛大学工学部電気電子工学科の高電圧工学研究室での取り組みについて, ご紹介させていただきました。

非常に短い瞬間ではあるが, エネルギーを時空的に圧縮することにより, 通常では達成することのできない特殊な物理現象を引き起こすことができます。

エネルギーの有効利用が非常に重要な現代社会において, ナノ秒パルスパワーの応用範囲はますます広がるものと思います。社会に役立つ新技術の創造を目指し, チャレンジを続ける所存です。

御清聴ありがとうございました