

パルスパワーの 基礎と産業応用

環境浄化、殺菌、材料合成、医療、農業、食品、生体、エネルギー

監修 堀越 智



図4 水中に置かれたコンクリート(左側)にパルスパワーを印加した後、並べられた小石や砂利(右側)(P.5)

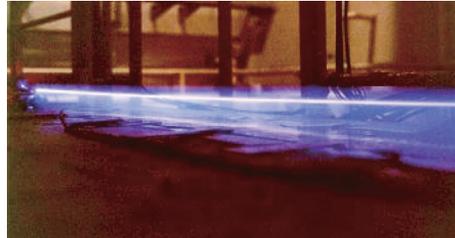


図6 床の上に置かれたアース電極と約10mの電線の間パルスパワーを印加した時の放電光(P.5)

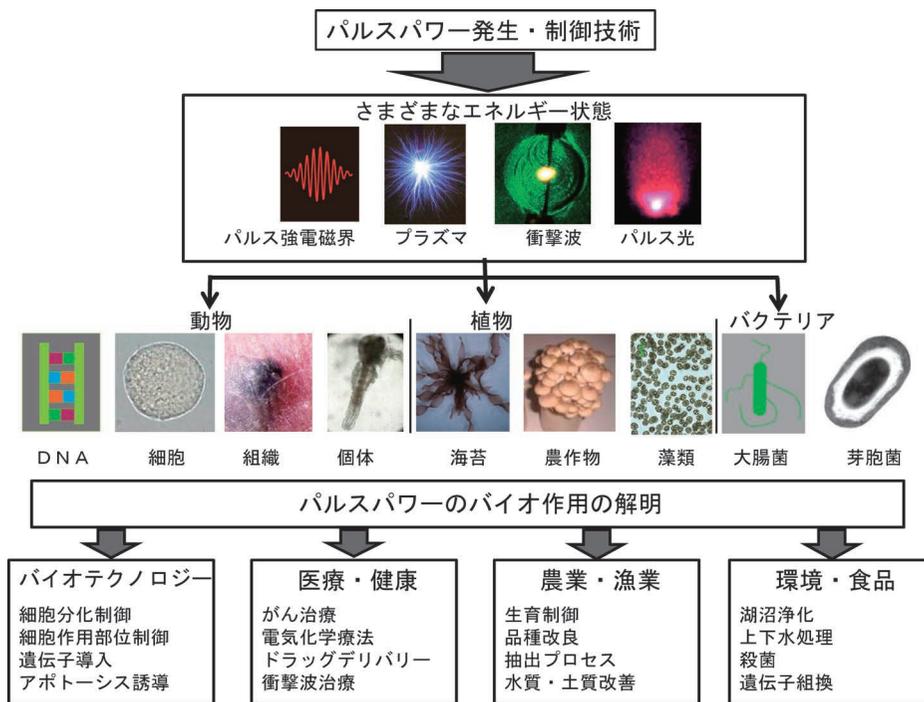


図9 異分野融合新学術分野であるバイオエレクトリクス(P.7)

(A) ドレイン電圧 10kV, ドレイン電流 255 A, (B) ドレイン電圧 10kV, ドレイン電流 12.8 A, 矩形波出力時の波形



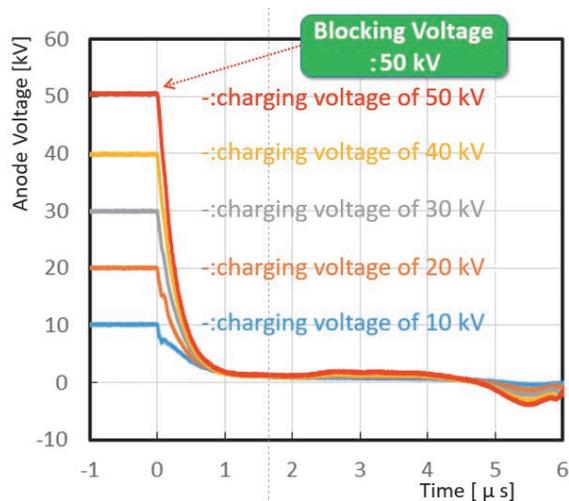
(C) ドレイン電圧 4 kV, ドレイン電流 135 A, 330kHz での振動波出力時の波形



各波形写真において、黄色はドレイン電圧で(A), (B)は 5 kV/div, (C)は 2 kV/div. 緑はドレイン電流で, (A), (C)は 100 A/div, (B)は 10 A/div. 青はトリガ信号で 50 V/div. 時間軸は全て 2 μs/div

図 2 13 kV SiC-MOSFET の評価試験結果(P.19)

(A) アノード電圧波形



(B) アノード電流波形

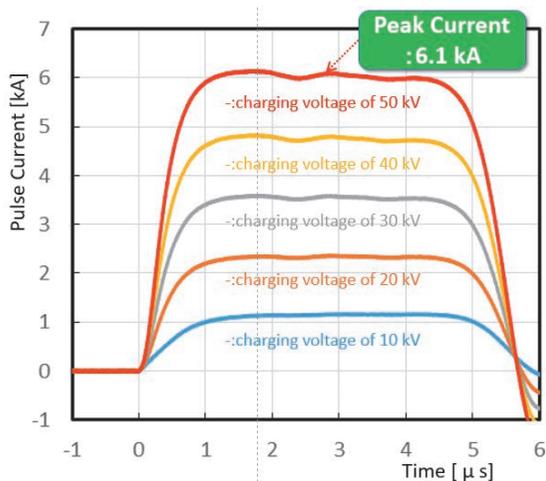
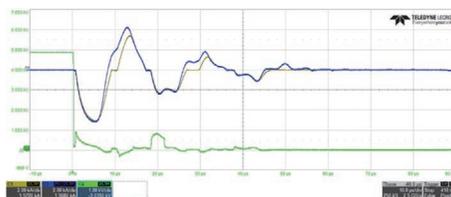
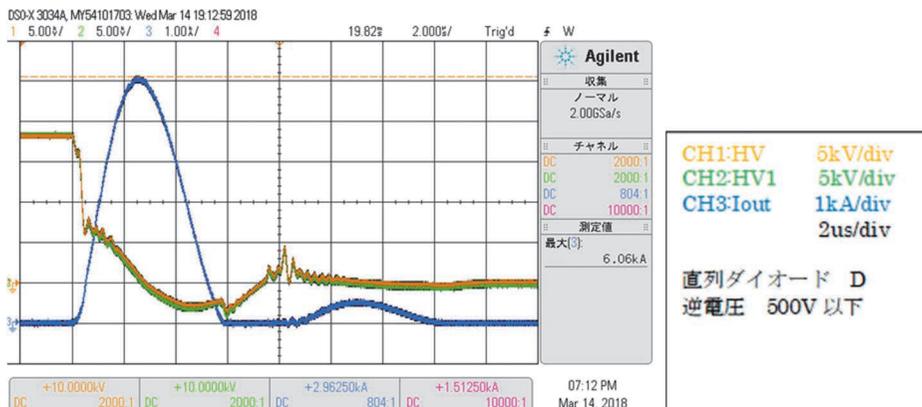


図 6 50 kV SI サイリスタスイッチ (P.23)



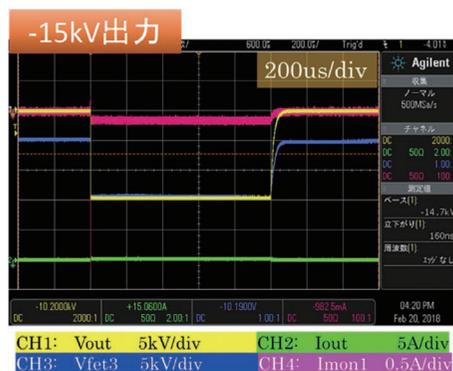
緑はアノード電圧, 1 kV/div. 青は負荷電流, 2 kA/div. 茶はアノード電流, 2 kA/div. 時間軸は 10 μs/div

図 9 MOS ゲートサイリスタ基板の評価試験結果 (P.24)



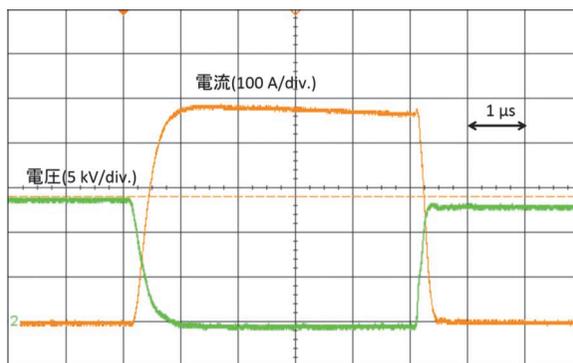
MOS ゲートサイリスタ基板を 5 直列 2 並列構成。緑と黄はアノード電圧、5 kV/div。青は負荷電流、1 kA/div。時間軸は 2 μ s/div。18 kVp、6 kAp の出力が 50 Hz の繰り返しで得られている

図 11 MOS ゲートサイリスタユニット評価試験結果(P.25)



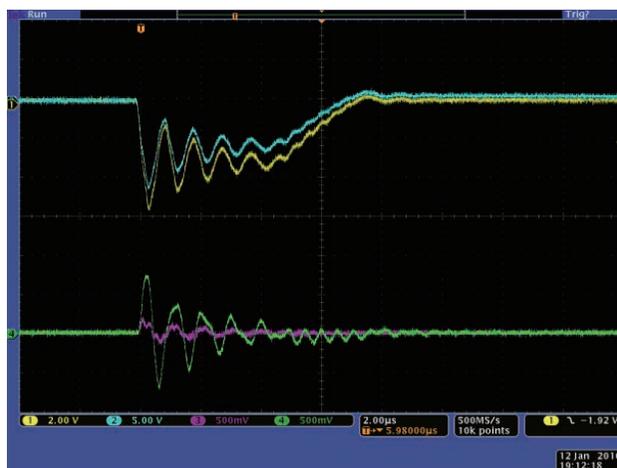
CH1(黄)は出力電圧(5 kV/div)であり、ピーク電圧は 15 kV。CH2(緑)は出力電流(5 A/div)であり、ピーク電流は 0.2 A。時間軸は 200 μ s/div であり、出力電圧のパルス幅は 1 ms。15 kVp、0.2 A、1 ms のパルスを 25 Hz の繰り返しで発生している

図 13 13 kV SiC-MOSFET を使用したスイッチの評価試験結果(P.26)



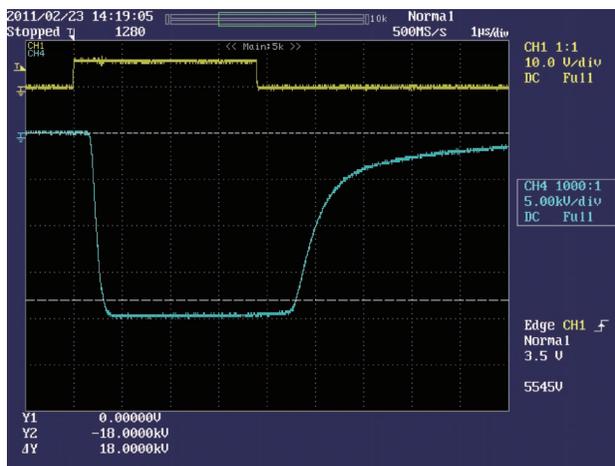
黄は出力電流(100 A/div)であり、ピーク電流は 490 A。緑はスイッチ電圧(5 kV/div)であり、最大電圧 14 kV。時間軸は 1 μ s/div であり、スイッチの立上り時間は 430 ns

図 15 13 kV SiC-MOSFET を使用したスイッチの評価試験結果(P.26)



CH1(黄)は出力電圧で 4 kV/div でピーク電圧 4.5 kV。CH3(赤)は出力電流で 10 A/div でピーク電流が約 2 A。横軸は 2 µs/div。負荷インピーダンスが引くと、パルストランスの浮遊容量、浮遊インダクタンスの影響で出力波形が振動してしまう

図 18 パルストランスを使用した場合の電子銃電源の出力波形例 (P.28)



CH1(黄)はゲート信号。CH4(青)が出力電圧波形で 5 kV/div。ピーク電圧は 20 kV_p。横軸は 1 µs/div。パルス幅 4.5 µs。出力波形に振動は見られず、立上りも早い

図 21 電子銃電源の出力電圧波形(負荷抵抗 1 kΩ接続時) (P.29)

(A) 外観写真

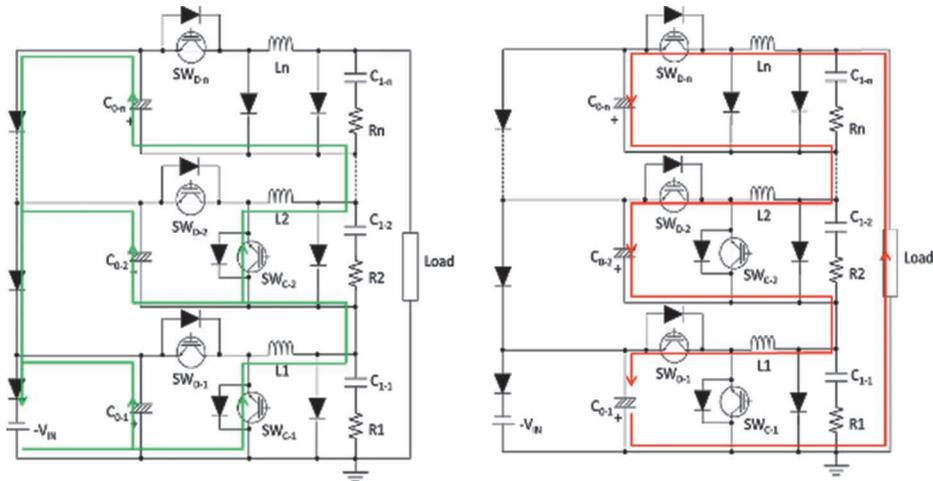


(B) 出力波形。青は出力電圧(20kV/div)であり、最大電圧100kV。黄は出力電流(50A/div)であり、最大電流88A。赤はゲート信号。時間軸は20μs/divであり、パルス幅は100μs



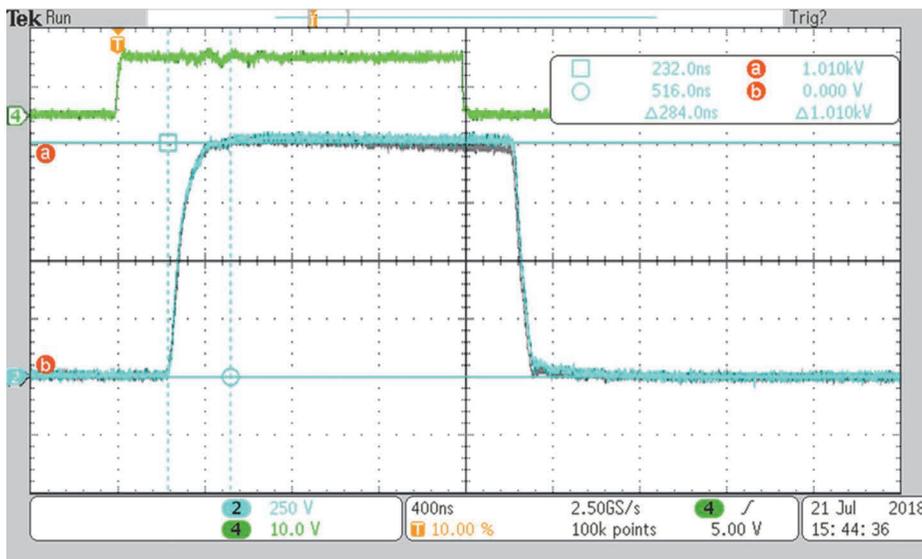
MARX 段数 40 段, 出力電圧 100 kV_p, 出力電流 10 A_p, パルス幅 150 μs, 繰返し 10 Hz

図 22 半導体 MARX 回路を使用した中性子発生装置用パルス電源 (P.31)



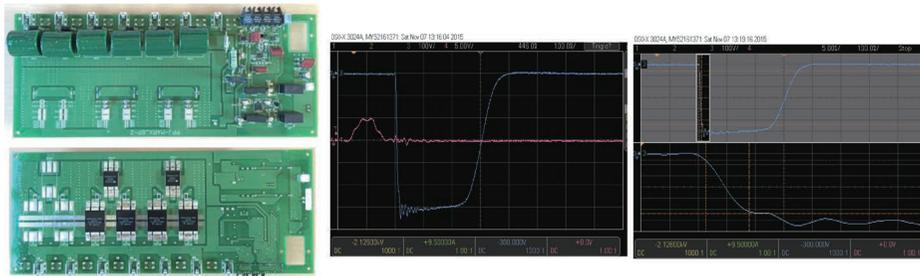
充電時は左の図の充電用スイッチ SWc-1, SWc-2 などが導通状態になり、緑の線に沿ってコンデンサ Co-1, Co-2 などに並列に充電される。放電時には充電用スイッチはすべてオフになり、放電用スイッチ SWd-1, SWd-2 などが導通することにより全てのコンデンサを直列に放電する

図 32 MARX 基板の充電時と放電時の電流の流れ方 (P.36)



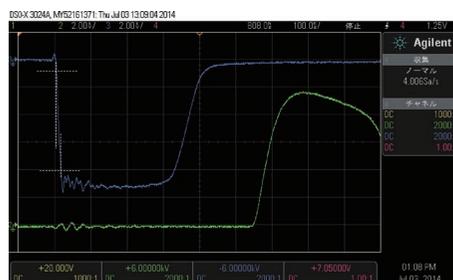
負荷抵抗 5 Ω 接続時の出力電圧波形。
 (青)：波形補正有り時の出力電圧波形 2.5 kV/div。ピーク電圧 10 kV
 (灰)：波形補正無し時の出力電圧波形 2.5 kV/div。ピーク電圧 10 kV
 (緑)：ゲート信号
 補正回路を活用することにより出力電圧波形の平坦性が改善されている

図 38 J-PARC RCS キッカー用 LTD 電源の出力電圧波形 (P.39)



左側の写真は MARX 基板の表面(上)と裏面(下)。中央の青色の波形は出力電圧波形。縦軸は 100 V/div。横軸は 100 ns/div。右側の写真は立上り部分を拡大したもの。横軸は 5 ns/div で立上り時間は 7 ns

図 42 超高速 MARX 基板とその出力電圧波形(P.42)



青色の波形は負荷抵抗 50 Ω 接続時の出力電圧波形。縦軸は 2 kV/div でピーク電圧は 9.4 kVp。横軸は 100 ns/div で立上り時間は 20 ns

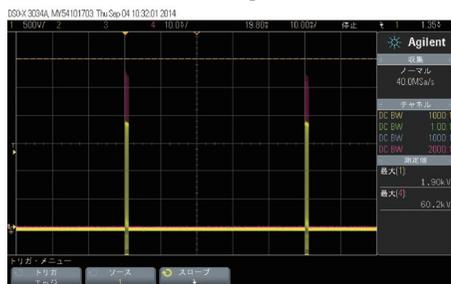
図 43 超高速 MARX 基板 16 段を使用した HV ユニットの出力電圧波形(P.42)



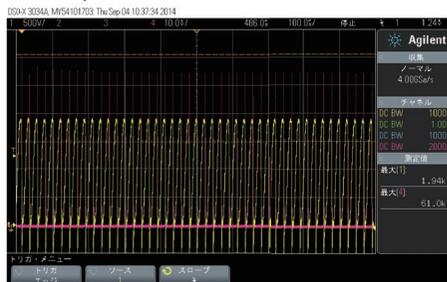
左側の青色の波形は正極性出力電圧波形。右側の波形は負極性出力電圧波形。両方とも縦軸は 10 kV/div。横軸は 100 ns/div。正極性、負極性ともピーク電圧は 60 kV で立上り時間は 40 ns。従来方式のパルスに比べて極めて高速の立上りを得ている

図 44 電圧重畳用パルストランスの出力電圧波形(P.43)

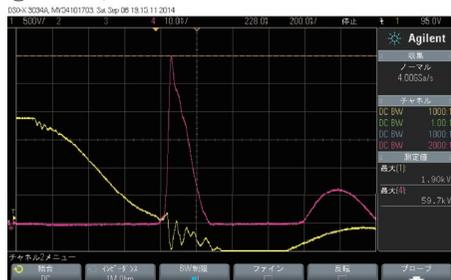
① 10ms/div (Burst Repetition 50ms)



② 100 μs/div (Burst 45kHz, 45 shots)



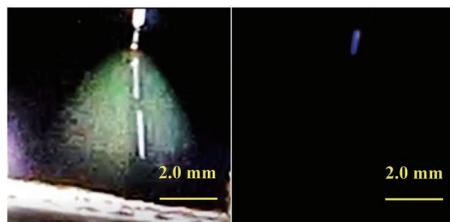
③ 200ns/div



黄の波形は図46の一次コンデンサC1の充電電圧波形で500V/div。赤の波形は出力電圧波形で10kV/div。45kHzのバースト周波数で45発のパルスを出力する運転を20Hzで繰り返している。①の波形で20Hzの繰り返しが確認できる。②の波形で45kHzで45発のパルスが確認できる。③で出力電圧60kVpで立ち上がり時間30nsであることがわかる

図47 SOS方式高電圧パルス電源の出力電圧波形(P.44)

(a) DC+5 kV



(b) DC+7 kV

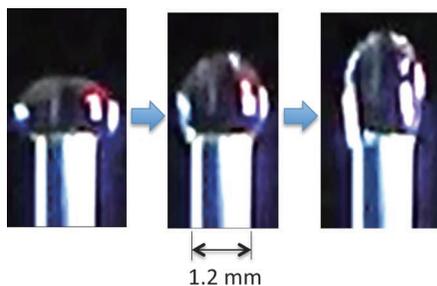
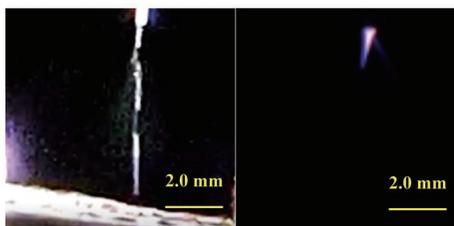


図22 正弦波交流電圧の重量により変形する水滴の写真(P.63)

図20 直流電界下で針先から放出される水滴の高速度撮影写真(1/1000秒)と放電光の長時間露光写真(30秒)(P.62)

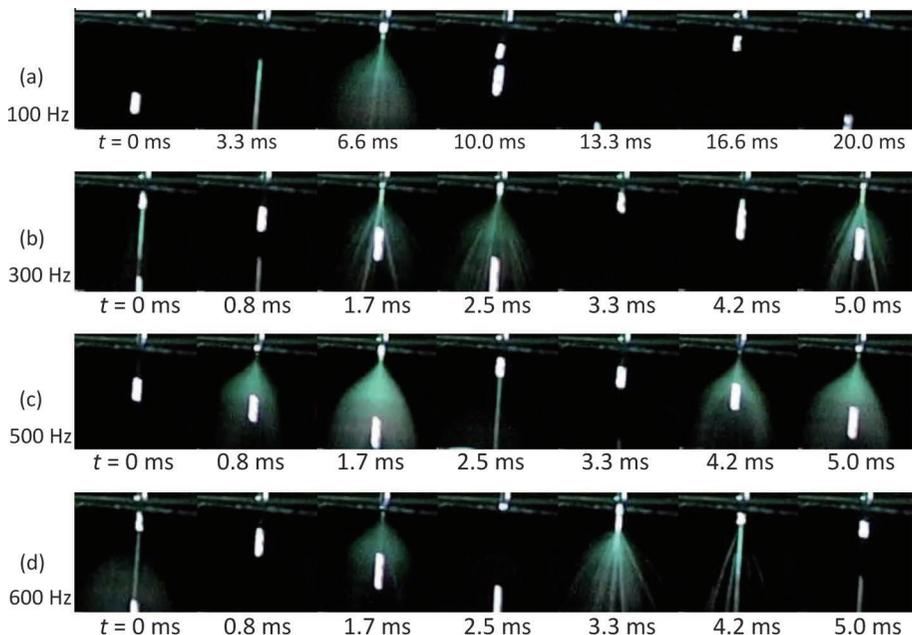


図 23 DC+6 kV に ac 3 kV を重畳したときの水滴の高速度撮影写真 (P.64)

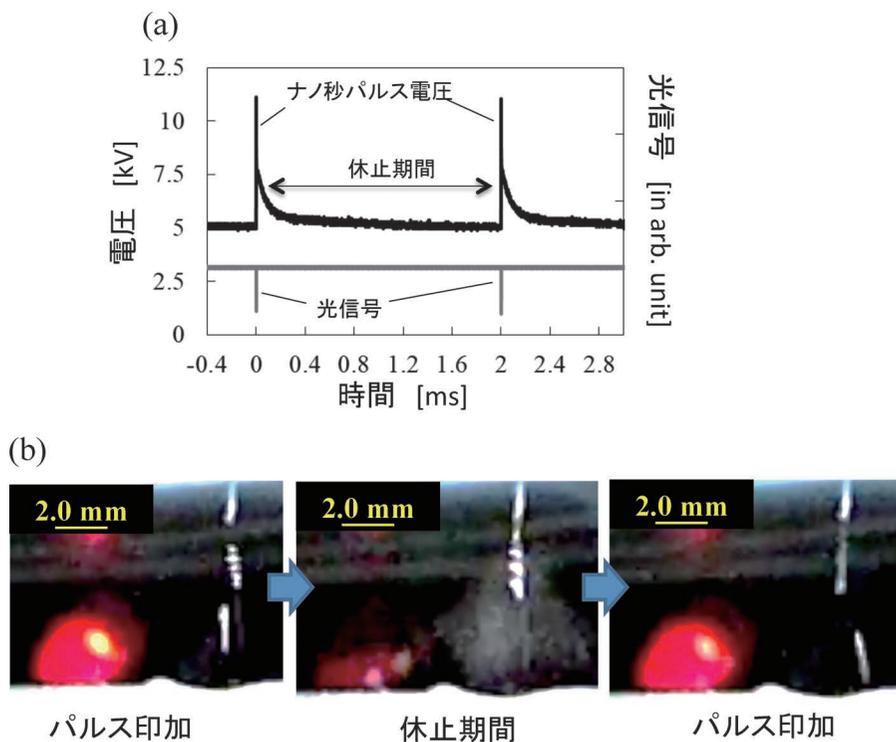


図 24 DC+5 kV に振動型インパルスを重ねたときの光信号と水滴の高速度撮影写真 (P.64)

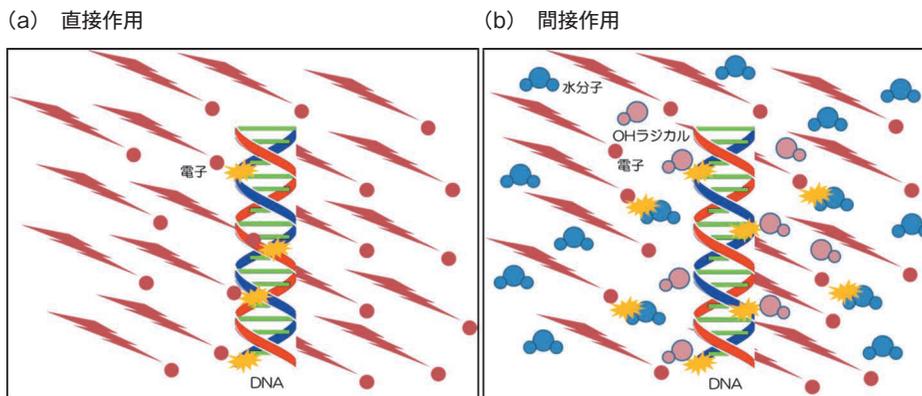
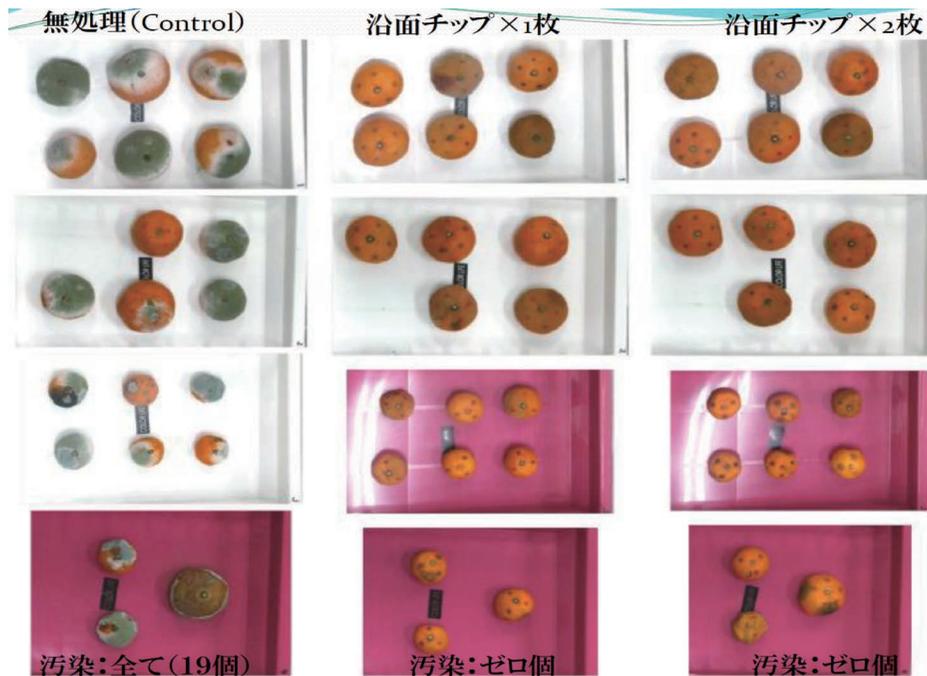


図1 電子線による滅菌メカニズム (P.68)



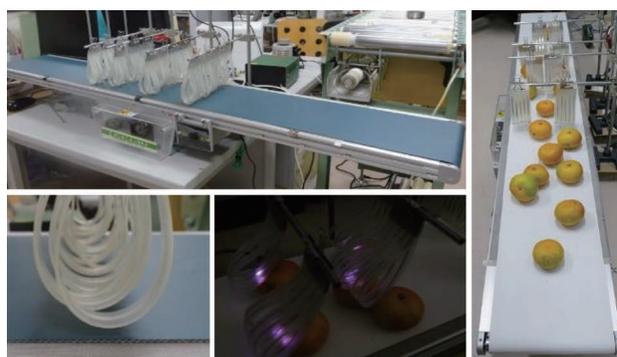
図7 電場の有無によるいちごの保存状態の差異 (P.111)



(保存期間：7日間)

提供：林信哉(九州大学大学院総合理工学研究院)

図8 沿面放電オゾンナイザを用いたみかんの鮮度保持(P.112)



提供：柳生義人(佐世保工業高等専門学校)

図9 ベルトコンベア型プラズマ殺菌装置(P.113)

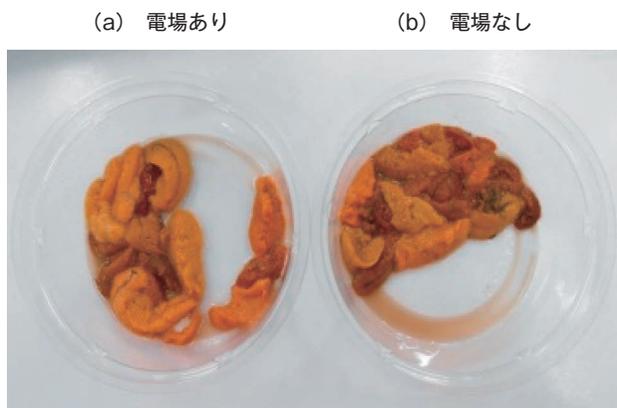


図 14 チルド保存 7 日後のウニの様子 (P.115)

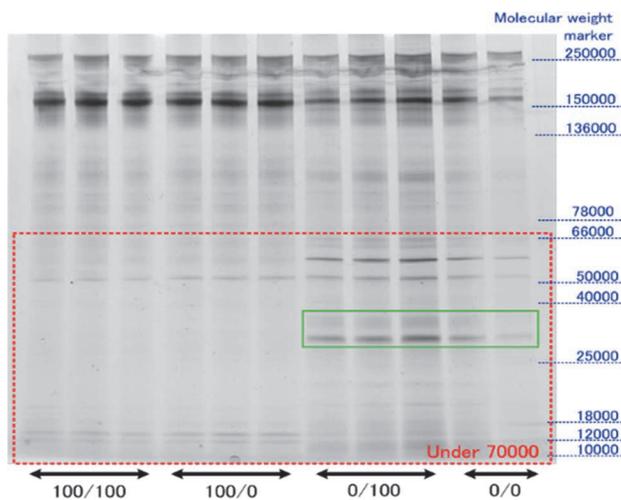


図 16 漏えいタンパクのゲルの泳動像
(100:電場あり, 0:なし) (P.115)

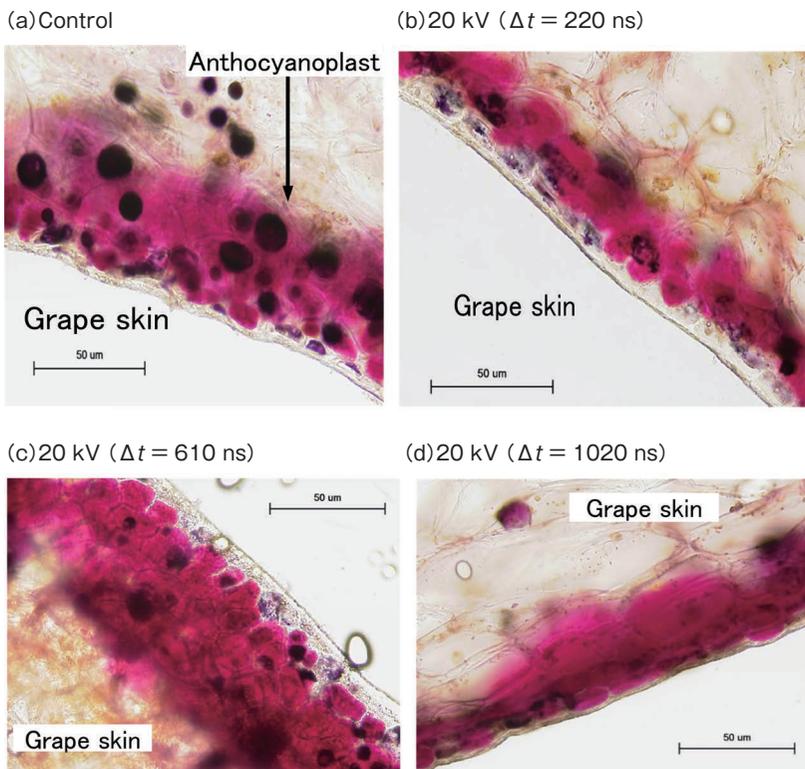
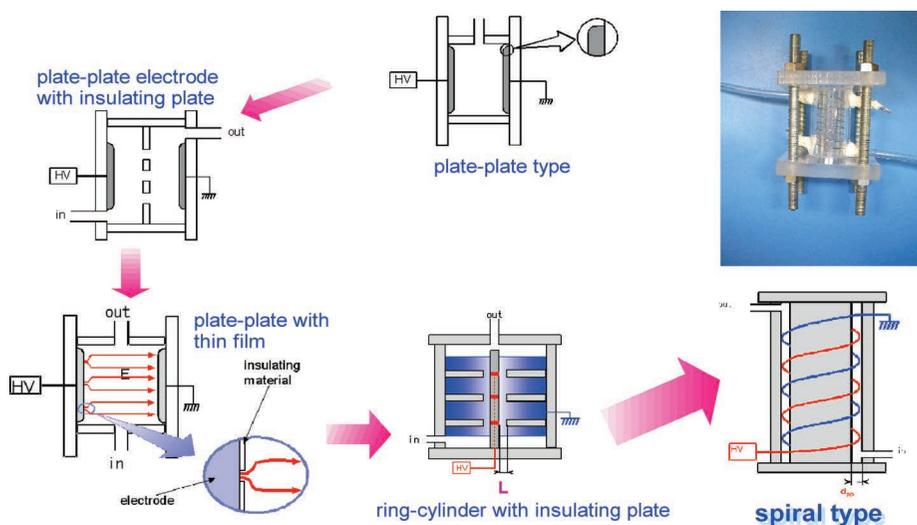


図 19 印加電圧のパルス幅とブドウ表皮細胞の状態変化の様子(P.117)



Local region of high-concentrated electric field seems to be effective for PEF inactivation. It is important to operate PEF inactivation without discharge plasma.

図 3 パルス殺菌処理槽(電極形状)の変遷(P.125)

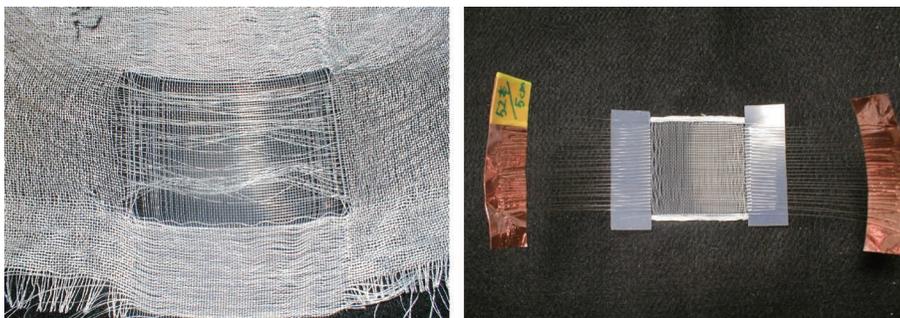


図5 タングステンワイヤーを織り込んだ織物(左)とパルス殺菌のための織物電極の作製(右) (P.126)

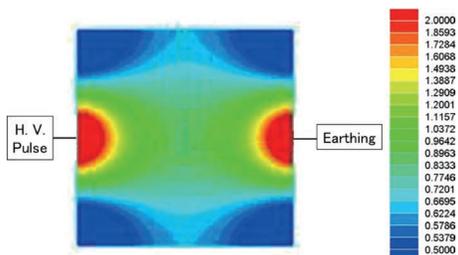
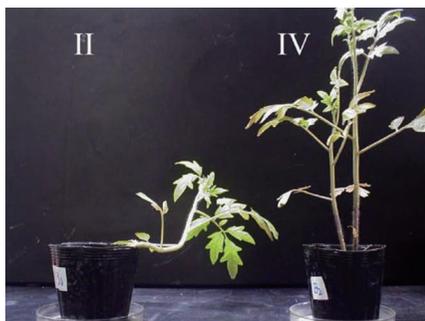


図16 図15における電界強度シミュレーション (P.131)

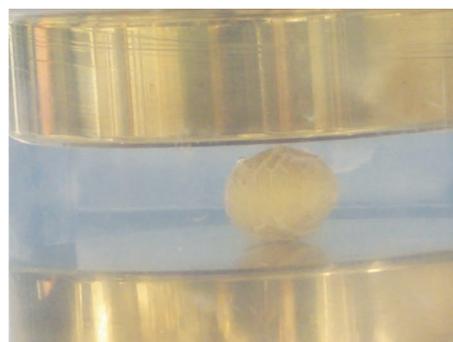
(a) トマト栽培全体



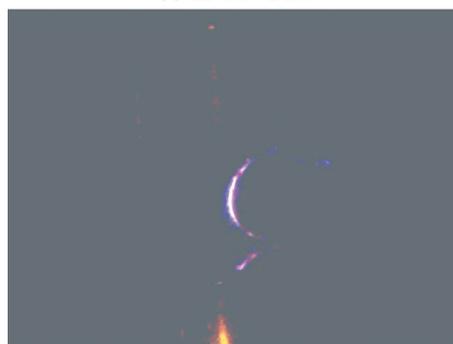
(b) 根の観察



図21 栽培7週間後のトマト苗IIおよびトマト苗IVの様子 (P.134)

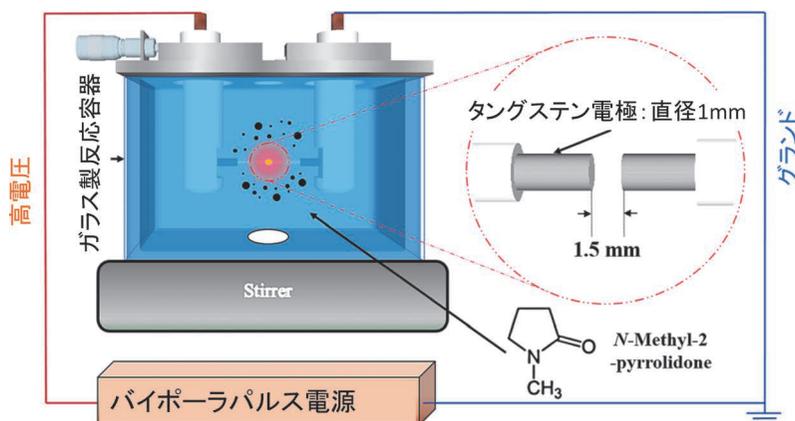


(a)電極間の状態



(b)放電発光

図4 水中の乾燥大豆で発生した放電の発光(P.142)



(Reproduced from Ref. 15) with permission from the Royal Society of Chemistry)

図4 ソリューションプラズマのセットアップの模式図(P.160)

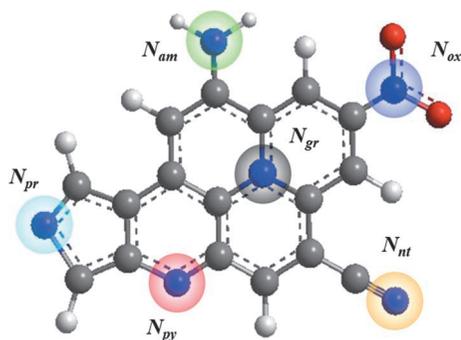
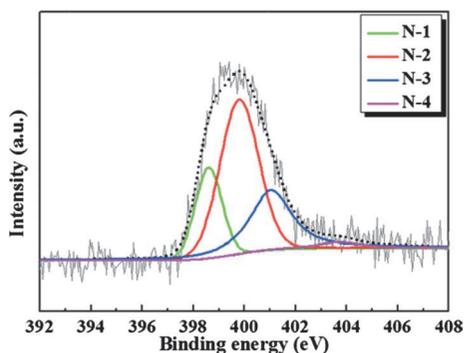
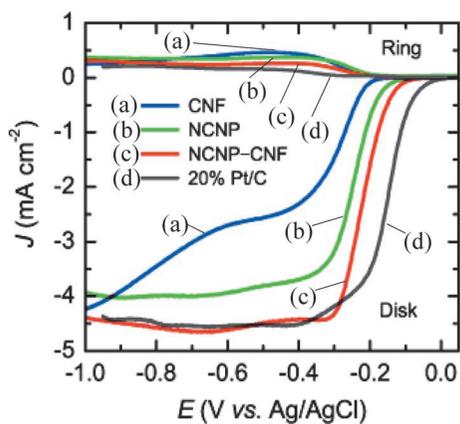


図7 カーボンに含まれる窒素の化学結合状態の模式図(P.162)



(Reproduced from Ref. 15) with permission from the Royal Society of Chemistry)

図8 NMP から合成したカーボンの XPS N 1s スペクトル(P.162)



(Reproduced with permission from ref. 18) Copyright 2016 ACS)

図13 未処理のCNF単体, NCNP単体, SPで合成したカーボン複合体(NCNP-CNF)のLSV曲線(P.165)

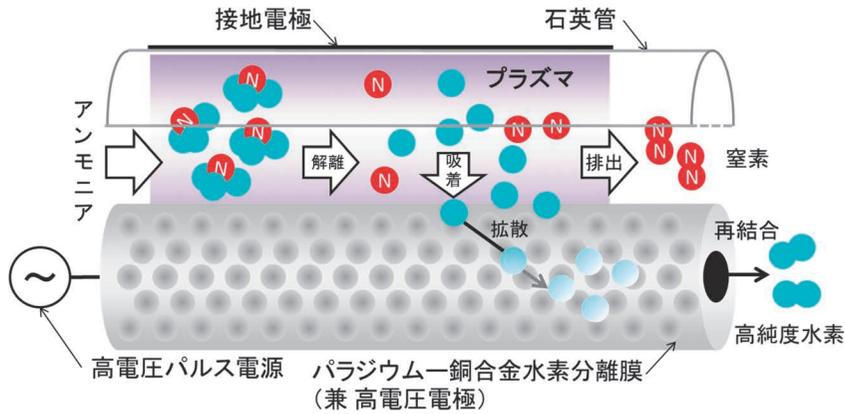


図8 プラズマ膜リアクターの構造と原理 (P.172)

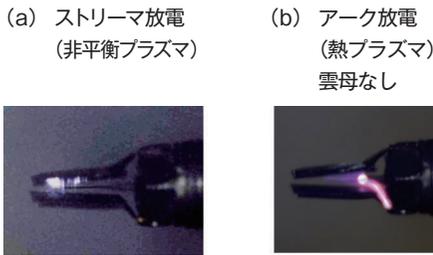
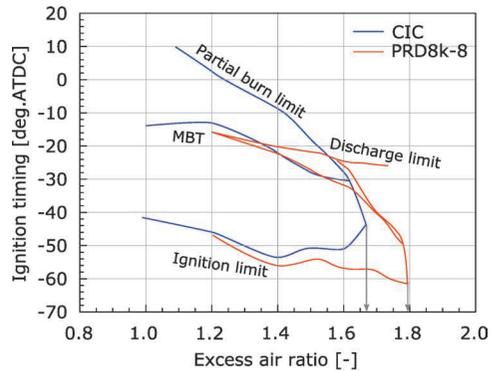


図8 放電の様子 (P.187)

(a) 空気過剰率 vs 点火タイミング



(b) 空気過剰率 vs CA50

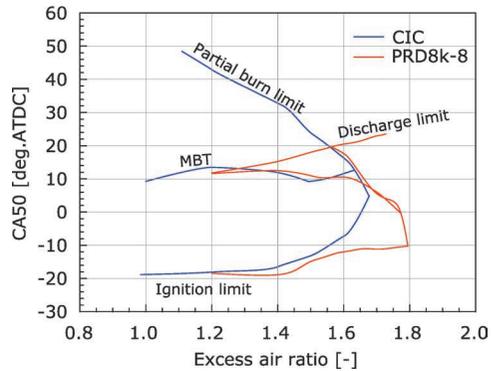


図15 希薄運転領域に及ぼす放電形態の影響 (P.190)

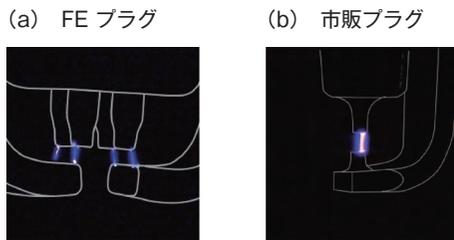


図14 FEプラグと市販プラグの放電の違い (P.189)

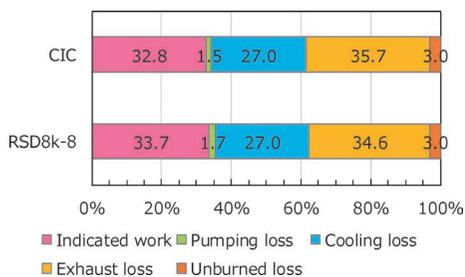


図 17 熱収支の比較 ($\lambda = 1.6$) (P.190)

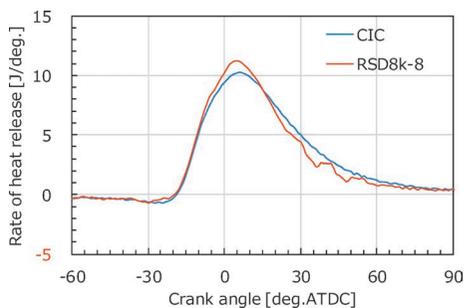


図 18 MBT における熱発生率 ($\lambda = 1.6$) (P.190)

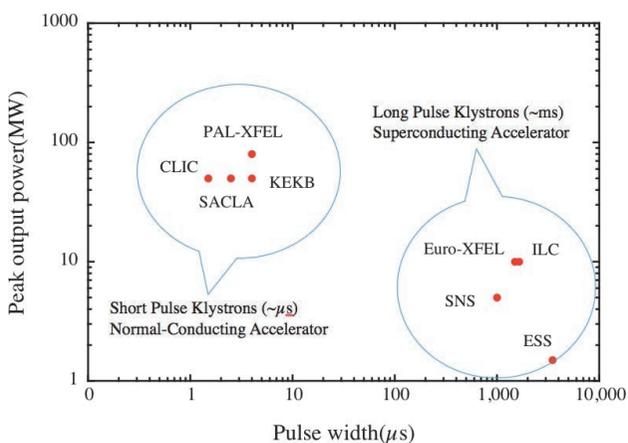


図 1 高エネルギー線形加速器で使われているクライストロンを出力ピーク電力とパルス幅で分類 (P.197)

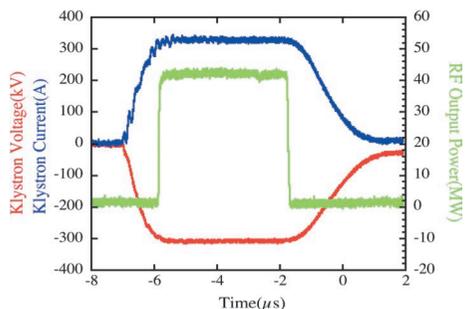


図 3 クライストロンの電圧, 電流, RF 波形 (P.198)

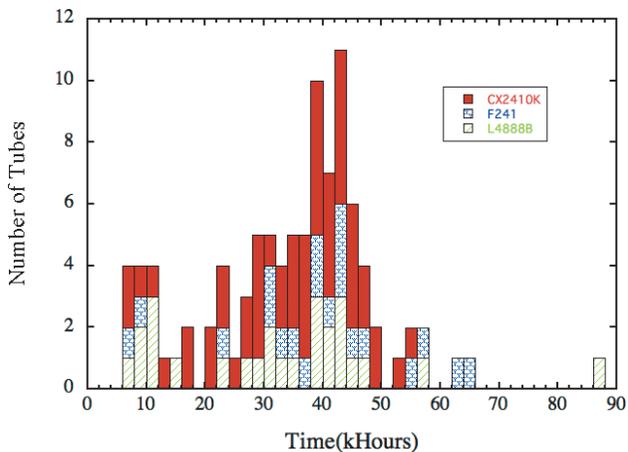


図4 サイラトロンの寿命分布 (P.199)

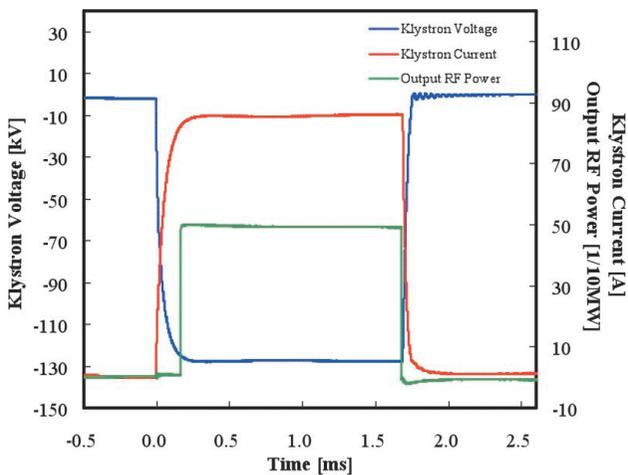


図8 クライストロンの電圧, 電流, RF 波形 (P.201)

発刊にあたって

読者の皆様は「パルスパワー」という言葉を聞いて何を想像されるであろうか？ 本書の著者の一人である江先生の書物を参考にする、パルスパワーとは電磁エネルギーの操作に関する学問であり、その歴史は、核融合の関連研究で萌芽期を迎え、高出力レーザーや高エネルギー粒子ビームの関連研究で成長期・成熟期を経過し、現在では材料や環境などの関連研究で進化期を迎えようとしている。基礎を確立した現在、パルスパワー技術は利用分野の普及と浸透のステージにあると考えられる。この技術は、大エネルギーを極短時間でパル的に印加することから、熱が発生する前に仕事を完結することができる。ごく短時間で電磁エネルギーの臨界場を作り出すことができるため、たとえばエクセルギーの高い電磁波を、エクセルギーの低い熱に変換される前に利用できる。このような高度なエネルギーの利用法は他にはなく、アイデア次第では革新的なプロセス利用を構築できる。一例として、この技術をプラズマに利用した分野では、環境保全、殺菌、乾燥、モノづくり、医療、生物、エネルギー獲得への応用がすでに報告されている。

本書では、この画期的な高度エネルギー利用プロセスを、さらにさまざまな産業界へ浸透させたいと考え、ユーザー目線でその入門書を担うべく発刊に至った。各章の構成はパルスパワーの基礎に加え、環境浄化、殺菌、材料合成、医療、農業、食品、生体、エネルギー、工学などを取り上げた。また、パルスパワーの専門家である各著者の皆様には、パルスパワーの存在を知らない読者に対しても、その魅力を認識していただくため、方程式を極力使わないようにしていただき、内容をイメージしやすいように図解を中心に解説していただいた。さらに、専門用語も極力使わないようお願いした。専門とは異なる章だとしても、一通り読んでいただき、新しい研究や新事業のヒントに役立ててもらえることを願っている。

最後に、パルスパワーの初心者である筆者の呼びかけに、快く応じていただき、短時間で文章を書きあげていただいた全筆者へ謝意を表す。さらに、(株)エヌ・ティー・エスの吉田隆代表取締役、平野英樹様にはご激励をいただき、やっと出版までたどり着きましたことに感謝する。

令和元(2019)年 夏

上智大学 堀越 智

▶ 監修者・執筆者一覧 ◀

(掲載順・敬称略)

【監修】

堀越 智 上智大学理工学部 准教授

【執筆者】

秋山 秀典 株式会社融合技術開発センター 代表取締役社長 / 熊本大学
名誉教授

江 偉華 長岡技術科学大学極限エネルギー密度工学研究センター 教授

徳地 明 株式会社パルスパワー技術研究所 代表取締役

門脇 一則 愛媛大学大学院理工学研究科 教授

吉田 昌弘 金属技研株式会社技術本部加速器応用部加速器応用課 課長

佐々木 満 熊本大学パルスパワー科学研究所 / 大学院先端科学研究部 准教授

末松 久幸 長岡技術科学大学大学院工学研究科 教授

鈴木 常生 長岡技術科学大学大学院工学研究科 准教授

菅島 健太 長岡技術科学大学大学院工学研究科

中山 忠親 長岡技術科学大学大学院工学研究科 教授

新原 皓一 長岡技術科学大学名誉教授

矢野 憲一 熊本大学パルスパワー科学研究所 教授

諸富 桂子 熊本大学パルスパワー科学研究所

高木 浩一 岩手大学理工学部 / 次世代アグリイノベーション研究センター
教授 / 副センター長

猪原 哲 佐賀大学理工学部 准教授

大嶋 孝之 群馬大学大学院理工学府 / 食健康科学教育研究センター 教授

南谷 靖史 山形大学大学院理工学研究科 准教授

馬杉 正男 立命館大学理工学部 教授

- 齋藤 永宏 名古屋大学大学院工学研究科未来社会創造機構 教授 /
信州大学先鋭領域融合研究群環境・エネルギー材料研究所 教授
- 石崎 貴裕 芝浦工業大学工学部 教授
- 牟田 幸浩 名古屋大学大学院工学研究科
- 蔡 尚佑 名古屋大学大学院工学研究科
- 神原 信志 岐阜大学大学院工学研究科 教授
- 早川 幸男 岐阜大学大学院工学研究科 助教
- 豊川 弘之 国立研究開発法人産業技術総合研究所計量標準総合センター
分析計測標準研究部門放射線イメージング計測研究グループ
研究グループ長
- 田上 公俊 大分大学理工学部 教授
- 森吉 泰生 千葉大学大学院工学研究科 教授
- 堀田 栄喜 東京工業大学名誉教授
- 明本 光生 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構加速器科学支援
センター 特別教授
- 堀岡 一彦 東京工業大学名誉教授 / 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器
研究機構 協力研究員

▶ 目 次 ◀

発刊にあたって

堀越 智

第 1 章 パルスパワーの基礎

第 1 節 パルスパワーとは

秋山 秀典

1. はじめに	3
2. パルスパワーの特徴とその利用	4
3. おわりに	7

第 2 節 パルスパワーの考え方

江 偉華

1. パルスパワーの発生	9
2. 回路的な考え方	9
3. 電磁的な考え方	12
4. まとめ	15

第 3 節 半導体パルスパワー電源

徳地 明

1. はじめに	17
2. シリコンカーバイド(SiC)の特徴	17
3. 開発が進む高電圧 SiC デバイス(> 10 kV)	18
4. 高電圧パルス発生回路と適用例	20
5. 高電圧パルス発生回路の将来展望	46

第2章 パルスパワーの応用

第1節 水中・水上および霧中でのパルス放電応用

門脇 一則

1. はじめに	51
2. 水中放電	51
3. 水上沿面放電	56
4. 霧中放電	61

第2節 電子線滅菌

吉田 昌弘

1. はじめに	67
2. 電子線滅菌	68
3. 電子線滅菌の現状	74
4. まとめ	76

第3節 パルスエネルギーを利用した高分子合成

佐々木 満

1. パルスエネルギーとは	79
2. パルス放電時の活性種の発生および計測	79
3. パルス放電を利用した高分子合成	81
4. おわりに	82

第4節 超微粒子

末松 久幸, 鈴木 常生, 菅島 健太, 中山 忠親, 新原 皓一

1. パルスパワー技術の新材料応用の困難さ	85
2. 超微粒子とは	85
3. 超微粒子作製法	86
4. パルス細線放電(PWD : pulsed wire discharge)法	86
5. 有機物被覆超微粒子	87
6. ガス中 PWD 法による有機物被覆超微粒子の作製例	88

7. 液中 PWD 法による炭化物超微粒子の作製例	89
8. 量産用 PWD 装置開発と PWD による粒子作製	90
9. まとめ	91

第5節 パルス高電界の医療応用

矢野 憲一, 諸富 桂子

1. はじめに	93
2. パルス高電界の医療応用	93
3. マイクロ秒パルス高電界を利用した細胞や人体への DNA 導入	95
4. マイクロ秒パルス高電界を利用した癌療法	97
5. ナノ秒パルス高電界による癌治療	100
6. 癌治療以外のパルス高電界の医療応用	103

第6節 ポストハーベスト段階での利用

高木 浩一

1. はじめに	107
2. 農業分野への高電圧・パルスパワー利用の概要	108
3. 農産物の鮮度・品質の維持への高電界・パルスパワー・プラズマの利用	110
4. 高電場を用いた水産物の鮮度維持	114
5. パルス高電場による成分抽出	116
6. おわりに	117

第7節 農業における発芽, 生育促進・制御などへの利用

猪原 哲

1. はじめに	119
2. 担子菌への応用, 種子の発芽, 成長促進・制御への応用	119
3. 休眠打破の応用	120
4. まとめ	120

第8節 食品

大嶋 孝之

1. はじめに	123
2. 液状食品の非加熱殺菌	123
3. ファージ(ウイルス)の不活化	129
4. 線虫防除への取り組み	130
5. 食品排水のプラズマ処理	134
6. おわりに	137

第9節 パルスパワーによる成分抽出および浸透制御

南谷 靖史

1. はじめに	139
2. パルスパワーによる成分抽出制御	139
3. パルスパワーを用いた穀物浸水性制御	141
4. まとめ	144

第10節 電磁エネルギーの定量化手法

馬杉 正男

1. はじめに	147
2. 生体試料に印加される電磁エネルギーの定量化	147
3. 実験評価例	151
4. まとめ	154

第11節 溶液中プラズマへの応用

齋藤 永宏, 石崎 貴裕, 牟田 幸浩, 蔡 尚佑

1. はじめに	157
2. ソリューションプラズマの反応	158
3. ソリューションプラズマによるカーボン材料の合成	160
4. おわりに	165

第 12 節 パルスパワーと水素分離膜

神原 信志, 早川 幸男

1. はじめに	167
2. パルスプラズマの装置構成	167
3. プラズマ場での化学反応	169
4. プラズマ利用の水素製造	170
5. プラズマメンブレンリアクター	171
6. プラズマメンブレンリアクターの産業応用	173

第 13 節 非破壊検査用小型電子加速器

豊川 弘之

1. 小型電子加速器	177
2. パルスパワーの応用例	178
3. 小型電子加速器の構成	178

第 14 節 内燃機関の点火と燃焼促進

田上 公俊, 森吉 泰生, 堀田 栄喜

1. 緒 言	183
2. 非平衡プラズマ点火の利点	183
3. 非平衡プラズマ点火の特徴	185
4. 非平衡プラズマ点火装置のエンジンへの適用例	188
5. マイクロ波によるエンジン燃焼の改善	190
6. マイクロレーザによるエンジン点火	192
7. 結 言	194

第 15 節 高エネルギー加速器

明本 光生

1. はじめに	197
2. 短パルス用クライストロン電源	197
3. 長パルス用クライストロン電源	200
4. 最近のクライストロン電源	201

第 16 節 核融合・高エネルギー密度科学

堀岡 一彦

1. はじめに	205
2. 高エネルギー密度状態とは	205
3. 核融合	206
4. 高エネルギー密度科学	209

※本書に記載されている会社名、製品名、サービス名は各社の登録商標または商標です。なお、必ずしも商標表示 (®、TM) を付記していません。

第1章 パルスパワーの基礎

第1章 パルスパワーの基礎

第1節 パルスパワーとは

株式会社融合技術開発センター/ 熊本大学名誉教授 秋山 秀典

1. はじめに

エネルギーを一定にしてパルス幅を短くすると、電力が増加する。その様子を図1に示す。たとえば、電力1kWでパルス幅が1秒の時、エネルギーは面積となり、1kJとなる。そのパルス幅を1m秒に圧縮すると電力は1MWとなり、1μ秒まで圧縮すると1GWとなり、1n秒にすると1TWとなる。世界の瞬時消費電力は約1TW、日本の瞬時消費電力は約100GW、九州の瞬時消費電力は約10GWである。このような巨大電力を短時間ではあるが、エネルギー圧縮技術を使うことにより、発生が可能である。軍事応用の場合は、世界の瞬時消費電力の100倍に相当する100TWのパルスパワーが使われることもあるが、産業応用にパルスパワーを使う場合、1MWから100MW程度が一般的である。

このように、パルス幅は短時間であるが、巨大な電力をパルスパワー¹⁾⁻⁹⁾と呼び、エネルギーを圧縮してパルスパワーを発生し、計測し、利用する技術を含めて、パルスパワー技術、パルスパワー工学、あるいはパルスパワー科学と呼ぶ。従来の直流や交流電力と比較して、短時間で巨大電力を発生し、その大電力を繰り返して発生することも可能である。

電力1kWを定常に用いて、産業応用レベルの100MWを繰り返し発生する場合、パルス幅を10n秒とすると、 $1\text{ kJ} / (100\text{ MW} \times 10\text{ n秒}) = 1\text{ kpps}$ となる。ここで、ppsとは、pulses per secondのことであり、一秒あたりのパルス数である。100MWは、およそ3万軒分の瞬時消費電力に相当している。一秒に1000回の割合で、パルスパワーを繰り返しずっと発生可能となる。軍事応用の場合は、超大電力のパルスパワーが必要なため、繰り返し間隔は長くなるが、産業応用を考える場合は、パルスパワーの電力は小さくても、10kppsを超える高繰り返しでの発生が要求される場合も多い。

パルスパワー発生装置は、USAのSandia National LaboratoriesにあるZマシンが世界最大である。その直径は33mの円盤形状、蓄積エネルギーは20MJ、パルス幅は100n秒、出力電流は26MA、放射するX線の出力は350TWである。主として、Zピンチを用いた核融合の研究に用いられている。一方、産業にも使うことのできる、コンパクト、軽量、メンテナンスフリー、安定した出力、および高繰り返し可能なパルスパワー電源が開発されてき

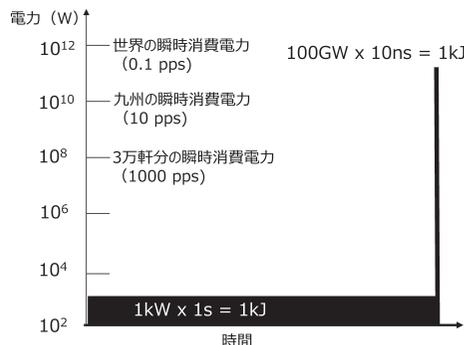


図1 パルス圧縮によるパルスパワー生成

第1章 パルスパワーの基礎

た。図2は、15 kppsで動作する磁気パルス圧縮方式パルスパワー電源¹⁰⁾であり、全固体素子で製作されているため、産業応用の条件を満たす装置である。民生用に使用するには極コンパクトで安価なパルスパワー電源が必要であり、8000 cm³とコンパクトなパルスパワー電源も(株)末松電子製作所にて開発されている。

パルスパワーは産業界に徐々に浸透しつつある。図3は、パルスパワーの応用分野をまとめた図である。パルスパワーは色々な分野で使われて、またさらに幅広く使われようとしており、環境、ナノテク、エネルギー、大型科学技術、リサイクル、農漁業、食物、医療に及んでいる。環境分野では、ダムや湖沼で夏に発生するアオコの処理、タンカーのバラスト水処理など、ナノテク分野では、パソコンで頻繁に使われるUSBメモリーを作るためのエキシマレーザー用電源、電子ビーム加工などがある。またエネルギー分野では、微細藻類からのオイルの抽出、バイオマスなど、大型科学技術分野では、加速器、核融合発電など、リサイクル分野では、コンクリートからのセメントと小石や砂利の分離、金属蒸着プラスチックの分離などがある。さらに農漁業分野では、畑を猪などから守る電気柵、果物や野菜の長期の鮮度保持のためのエチレン分解など、食物分野では、細胞膜に多数の穴をあけて食物を処理する常温調理器、ワイン製造などがある。医療分野では、歯科治療、衝撃波治療など、多くの研究開発が行われると共に、一部はすでに実用化されている。今後、さらに多くの新たな応用分野が開拓されるものと期待される。

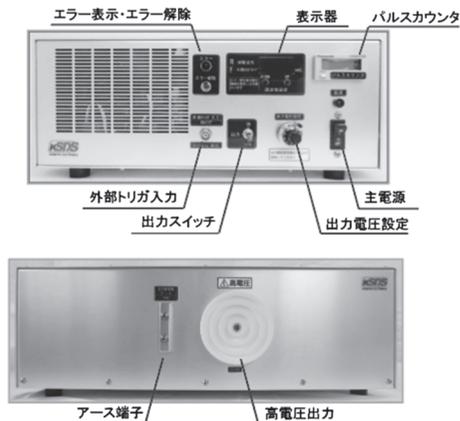


図2 15000 ppsで動作する高繰り返しパルスパワー電源、上の写真が充電コントロールユニット、下の写真がパルスパワーユニット¹⁰⁾

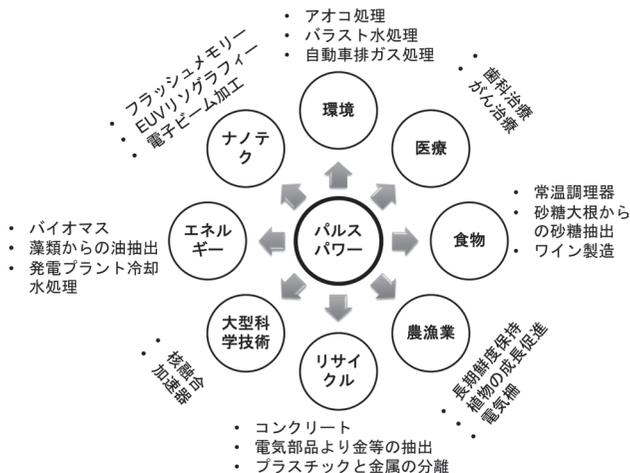


図3 パルスパワー応用分野の全体像

2. パルスパワーの特徴とその利用

パルスパワーの応用分野が広がっている理由は、産業用パルスパワー電源が比較的安価に購入できるようになってきたことと、交流や直流にはないパルスパワーの特徴によっている。以下、パルスパワーの特徴と特徴を利用した例について述べる。

パルスパワーの特徴として、最初にパルス大電力であることが挙げられる。図4は、パルスパワーを水中に置かれたコンクリートに印加した写真である。小石と砂利とセメントに分離されている。放電がコンクリート内に存在するわずかな気体を通して起こり、続いてコンクリート内部で発生した衝撃波により分離している。パルス大電力ゆえに起こった現象である。



※口絵参照

図4 水中に置かれたコンクリート(左側)にパルスパワーを印加した後、並べられた小石や砂利(右側)

極短パルス高電界も、パルスパワーの特徴として挙げられる。図5は、細胞に1Vの電圧を印加して、印加周波数を変えて計算した図である。細胞の直径が仮に10 μ mとすると、電界は100 kV/mとなるが、実際にはMV/mと大きい電界をかける。周波数が低いと、細胞膜がコンデンサとなり、細胞膜にすべての電圧がかかる。細胞膜の片方で0.5Vであるので、両サイドの細胞膜を考えると1Vとなる。周波数が高くなるにしたがって、核膜、核内、および細胞質にも電界がかかるようになる。パルス幅を短くすると高い周波数成分が存在するようになり、細胞膜以外に電界がかかることとなる。このような現象を使って、がん細胞にアポトーシスを誘導する実験もなされている。

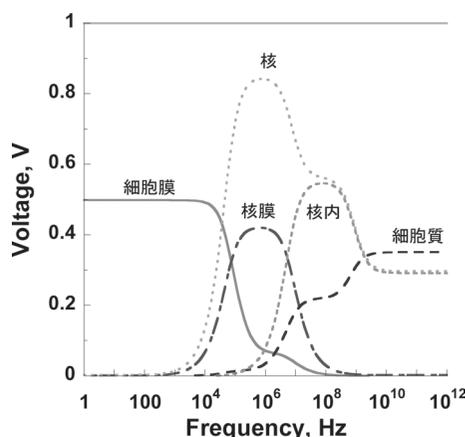
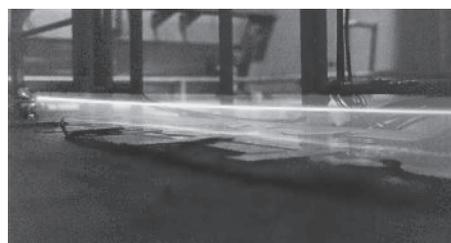


図5 細胞に電圧1Vを印加した時に、細胞のどこに電圧がかかるかの計算値であり、その周波数依存性

極短パルス大電流も、パルスパワーの特徴として挙げられる。図6は、床に置かれた銅板をアース電極とし、約10mの細い電線を銅板上に張り、パルスパワーを印加した時の写真である。極短パルス大電流ゆえに全体に放電している。極短パルスであることが雷のようなアーク放電が起こることを阻止し、大電流であることが、10mに亘る均一な放電を可能としている。この均一な放電中に排ガスに含まれる窒素酸化物を通すと100%の分解が可能である。



※口絵参照

図6 床の上に置かれたアース電極と約10mの電線の間パルスパワーを印加した時の放電光

現在試みられている多くのパルスパワーの産業応用は、研究段階のものも多いが、産業応用に成功している例として、パーソナルコンピュータでよく使われるUSBメモリーなどを製造するのに使われる事例と、イノシシや鹿などから農場を守る電気柵の事例を取り上げる。

第1章 パルスパワーの基礎

回路パターンを露光装置を用いて転写する技術はリソグラフィ(露光技術)と呼ばれている。現在、この露光装置として、エキシマレーザ光源がしばしば使われている。エキシマレーザ光源ではパルス放電が使われており、このパルス放電を起こすためにパルスパワー電源が用いられている。図7は、パルスパワー電源でエキシマレーザ光源を作り、この光源が組み込まれた半導体露光装置によって半導体デバイスの微細化を達成し、製造された半導体デバイスを組み込んだ電子機器が広く使われている。その販売額は世界の名目 GDP の3%弱である。このように、パルスパワー技術が電子機器市場の根幹技術となっている。

農業分野においても、成功例がみられる。イノシシ、鹿、猿、熊などが山から下りてきて食べ物をあさることが頻繁に起こっている。東北地方においてもイノシシが出てくるのが話題になり、これらの動物が農場に入り農作物を荒らす被害は大きい問題となっている。図8¹¹⁾に示すように、電線で農場を囲み、電線と大地にさされたアース棒の間に、パルス高電圧を1秒に1回程度印加する。たとえば猪が農場に入ろうとして、電線に触ると電線からイノシシ、アース棒に電流が流れ、イノシシは電気ショックを受ける。イノシシが電気ショックを受けるという学習をすることにより、農場には入らなくなる。このようなシステムを電気柵と呼ぶ。電気柵は、1975年以來、(株)末松電子製作所で販売されており、パルスパワー技術が古くから使われている例である。

パルスパワーの応用展開はさまざまあるが、パルスパワーの生体への作用に注目し、図9に示すように、パルスパワーの発生・制御技術、パルスパワーからプラズマや衝撃波などにエネルギー形態を変換し、パルスパワー自体を含め

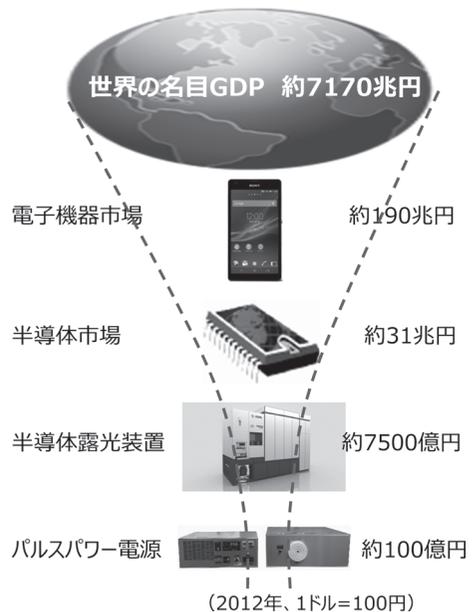


図7 パルスパワー電源を組み込んだ半導体露光装置により半導体デバイスが製造され、電子機器に組み込まれる様子

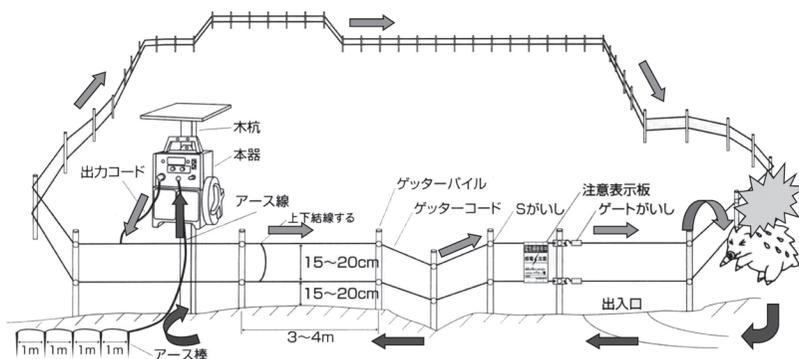


図8 電気柵の詳細図¹¹⁾

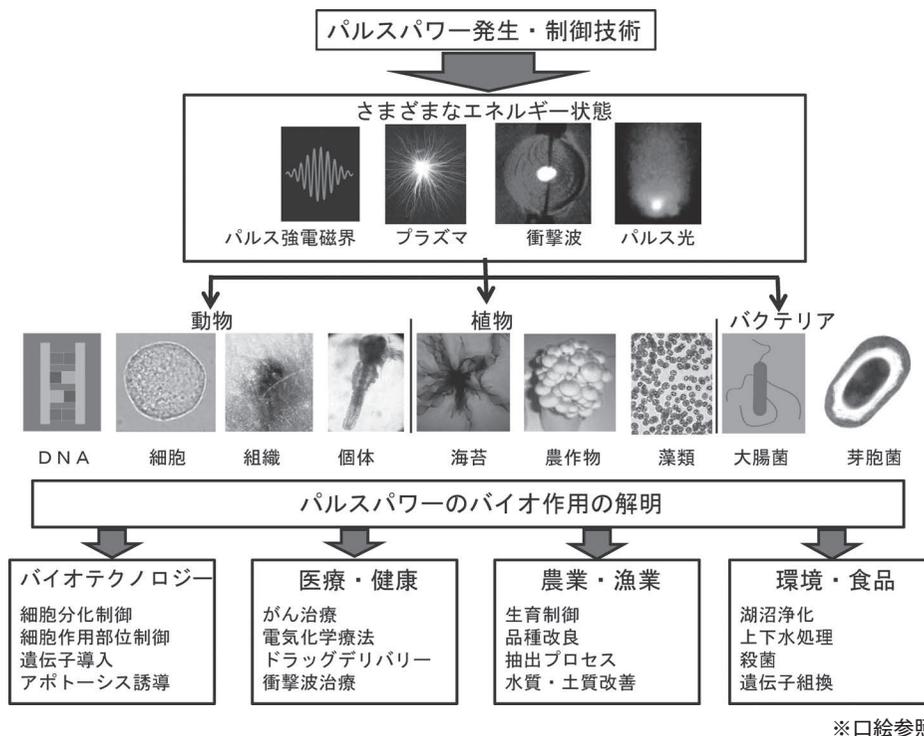


図9 異分野融合新学術分野であるバイオエレクトリクス

こららの変換されたエネルギー形態の動物，植物，バクテリアへの作用効果を解明し，バイオテクノロジー，医療・健康，農業・漁業，環境・食品へ展開する異分野融合新学術分野は，バイオエレクトリクスと呼ばれている。熊本大学，USAのオールドミニオン大学，ドイツのカーlsruエ技術研究所(KIT)の間で，2005年にバイオエレクトリクスの研究交流協定が結ばれて始まり，現在は欧米を中心に15機関が参加している。著者が熊本大学に在籍中の2017年に，オールドミニオン大学のDr. Richard Hellerと共編者となって，世界初のBioelectrics¹²⁾を出版した。

3. おわりに

本稿の最後に，パルスパワー技術を用いた産業応用の今後の展望について考えてみたい。パルスパワーの応用分野への取り組みは，世界の大学，企業，研究機関で取り組まれており，隔年で開催されているパルスパワー国際会議にて発表されている。パルスパワーの応用研究は，それぞれの応用に適したパルスパワー電源作りから始まり，新たな応用の基礎研究，開発研究へのモード変換，事業化・実用化と繋がる。パルスパワー技術の産業応用の観点から見た場合，一つ一つ製造・販売につなげる試みが，さらに多くのパルスパワー応用製品を生むと思われる。

第1章 パルスパワーの基礎

文 献

- 1) 原雅則, 秋山秀典: 高電圧パルスパワー工学, 1-290, 森北出版(1991).
- 2) 京都ハイパワーテクノロジー研究会編: パルスパワー工学の基礎と応用, 1-258, 近代科学社(1992).
- 3) 八井浄, 江偉華: パルス電磁エネルギー工学, 1-218, 電気学会(2002).
- 4) 秋山秀典編著: 高電圧パルスパワー工学, 1-172, オーム社(2003).
- 5) G. A. Mesyats: Pulsed Power, 1-564, Springer(2005).
- 6) H. Bluhm: Pulsed Power Systems: Principles and Applications, 1-326, Springer(2006).
- 7) J. Lehr and P. Ron: Foundations of Pulsed Power Technology, 1-625, Wiley(2017).
- 8) A. Kuchler: High Voltage Engineering, 1-631, Springer(2018).
- 9) 高木浩一, 金澤誠司編著: 高電圧パルスパワー工学, 1-280, 理工図書(2018).
- 10) 株式会社末松電子製作所ホームページ, パルスパワー電源装置,
<http://www.suematsu-el.jp/>
- 11) 株式会社末松電子製作所ホームページ, 電気さく,
http://www.getter.co.jp/electric_fence1.html
- 12) H. Akiyama and R. Heller: Bioelectrics, 1-481, Springer(2017).

この先をご覧いただくには、パスワードが必要です。

制限つきPDFで全ページをご覧いただけます。
(制限内容：閲覧期間の設定、コピーやプリントの禁止など)

- ・ PDFの閲覧

「パスワード」と「専用のビューア」（無料）が必要です。
費用は一切かかりません。

※WindowsのPCでのみご覧いただけます。予めご了承ください。

- ・ パスワード ※電子試読ページよりお申込みください

<https://www.nts-book.com/ntsの電子試読>

ページ下部にお申込みフォームがあります。

右のQRコードからも
電子試読ページにアクセス
いただけます。



- ・ ビューアのダウンロード

PDFは、株式会社スカイコムのSkyPDF Viewer（無償のPDFビューア）をダウンロードしてご覧いただけます。

※Adobe Acrobat Readerなど他のPDF閲覧アプリケーションではご覧になれません。

SkyPDF Viewer 無償ダウンロード：

<https://www.skycom.jp/free/>

▶ 索引 ◀

英数・記号

Ba(バリウム)含浸型タングステン 70

Caenorhabditis elegans 130

CAS 冷凍 115

CH 活性化 159

DAMPs 103

de-Qing 回路 198

DNA
 導入法 95
 ワクチン 96

DSRD 20

EOG 滅菌 67

ESOPE 99

GaN 17

IES 185

IGBT 18, 201

ILC 200

Immunogenic cell death 103

iPS 細胞 96

LaB6 70
 = 六ホウ化ランタン

LC 共振回路 201

Linear Transformer Driver 37

LTD 37

MARX 回路 27

Marx 型パルス電源 201

MOCVD リアクター 174

MOS-FET 19

MOS ゲートサイリスタ 22

n 電子系分子 158

OH ラジカル 68

P2 Marx 型電源 202

PEF 殺菌 123

PFN 21

Preharvest 108

PWM 202

Q
 値 193
 スイッチ 192

Sandia National Laboratories 3

SiC 17

SI サイリスタ 22, 185

SOS 20
 方式 44

TOC 135

Warm Dense Matter 205

X 線 177
 イメージング 181
 検出器 181
 光電子分光 161
 撮影 178
 発生装置 180

Z マシン 208

π
 共役系 158
 結合分子 158

σ 結合分子 158

あ行

アーク放電 184

アポトーシス	102	ファイバー	163
アモルファス	163	回転リング電極	164
アレニウス式	170	解離反応	169
安全性	94	化学療法	98
アンモニア	172	架橋	
イオナイザ	114	タンパク質	102
遺伝子改変生物	96	反応	102
医療応用	93	過酸化水素水	158
印加電圧	168	ガス	
インジゴカルミン	56	エンジン	188
インダクタンス	87	～中	91
インパルス	52	～中 PWD	88
インピーダンスマッチング	52	加速	
ウイルス	129	管	74
液中 PWD	89, 91	器	177, 197
液滴	65	活性化エネルギー	170
エチレン	113	可飽和インダクター	11
エネルギー		ガリウムナイトライド	17
変換効率	86	カルシウムエレクトロポレーション	100
密度	171	慣性核融合	205
エレクトロ		間接作用	68
スプレー	61	官能評価試験	127
ポレーション	93, 95	癌	97
応用分野	4	細胞	97, 102
オゾン	134	治療	97, 103
処理	112	ガンマ線滅菌	67
オリーブ油	134	緩和過程	211
織物電極	126	キナーゼ	101
オレンジジュース	127	キノコ増産	110
温度依存性	124	希薄燃焼限界	192
		揮発性有機化合物	79
		忌避作用	132
		キャビテーション	52
		牛乳	128
		休眠	120

か行

カーボンナノ	
チューブ	160

打破効果 120

虚血性心疾患 103

クーロン障壁 206

空間電荷 55

クライストロン 73

クラスター 209

グラフィイト 160, 161

グラフェン 160

グリセロール 134

グロー放電 157

形成遅れ時間 54

軽量化 181

血管新生 104

血小板凝集 104

ゲノム編集 96

コージェネレーション 188

高圧蒸気滅菌 67

高エネルギー 180

密度科学 205

合金 86

高繰り返しパルス電源 185

抗酸化物質 140

高周波 178

型 70

高圧電源 168

電力 74

高静水圧加圧抽出 140

酵素抽出 140

高電圧パルス

殺菌 32

電源 17

光電子増倍管 55

小型

化 76, 181

電子加速器 177

極短パルス

高電界 5

大電流 5

枯草菌 61

コバルト 60 69

固有振動周波数 62

コロナ放電 184

混載輸送 113

さ行

サイクリックボルタモグラム 162

再生医療 96

細線爆発 210

法 86

最適点火時期 190

細胞 93

死 98, 102

増殖 97

～内応答 100

～内カルシウム 100, 102

～内導入 93

膜 93, 100, 123

サイラトロン 17, 198

サイリスタ素子 199

サグ率 200

殺カビ 112

雑草防除 109

酸化

ガリウム 46

還元反応 157

物 86

防止 88

酸素還元反応 160

残留性有機汚染物質 79

磁気	
スイッチ	11
パルス圧縮方式パルスパワー電源	4
シグナル伝達経路	101
自己電磁場	208
シスプラチン	98
脂肪酸	134
ジュール熱	172
重粒子線	206
受託照射サービス	75
腫瘍	97
準静電界	148
衝撃波	5, 51, 205
状態方程式	205
常伝導	197
食品	
鮮度保持	111
排水	134
食用油	134
処理温度依存性	127
シリコンカーバイド	17
神経変性疾患	102
浸潤	97
心臓	94
心電図	94
進展速度	57
深度線量分布	69
スーパーオキシドディスムターゼ	140
水上浴面放電	56
水素	
キャリア	170
精製装置	174
透過流束	173
～の酸化反応	169
～のリサイクル	174
分離膜	171
分離膜モジュール	172
ラジカル	169
水中放電	51
スキャンホーン	71
図示燃料消費率	192
図示平均有効圧力	191
ストリーマ放電	51, 184
ストレス	101
応答	101
センサー	101
整合抵抗	53
生体電位	152
静電	
エネルギー	59
型	70
農薬散布	109
噴霧	61
誘導サイリスタ	22, 185
生乳	127
絶縁	
ゲート型バイポーラトランジスタ	18
破壊電圧	81
線形加速器	74
線虫	130
頭数	132
防除	134
線量率	69
総括反応	171
素反応	169
ソリューションプラズマ	157

た行

第一種放射線取扱主任者	76
-------------	----

大気圧プラズマ	167	重畳回路	40
耐酸化皮膜	87	電界	
ダイヤモンド半導体	46	強度	131
ダイレクトスイッチ方式	200	効果トランジスタ	19
脱色	79	シミュレータ	131
炭化物	89, 91	電気	
短・中鎖脂肪酸	136	陰性度	160
タンパー効果	210	化学治療	98
タンパク質		燻製	110
合成	101	柵	6
～のリン酸化	101	集じん	110
チタン箔	71	穿孔	107
窒素固定化	109	ダイポールモデル	147
茶葉の選別	109	電子	
注射針	62	エネルギー	169
中性子	207	温度	158
超音波破碎	141	銃	70, 178
長鎖不飽和脂肪酸	136	線滅菌	67
重畳	63	なだれ	54
超伝導	197	ボルト	178
超微粒子	85, 89, 91	電磁	
超臨界二酸化炭素	81	エネルギー	147
直接作用	68	パルス	205
チョッパーMARX方式	33	伝搬速度	13
チョッパ回路	202	電離放射線障害防止規則	76
通電解凍	110	透過	
低温要求	120	率	173
低価格化	76	力	69, 181
テトラコーン	62	同軸ケーブル	53
転移	97	導電率	126
点火	183	特性インピーダンス	13
条件	207	ドジメトリックリリース	69
特性	186	土壌病原虫	131
電圧		トマト苗	132
増加率	184	ドライバ	206

トランス
 グルタミンナーゼ2 102
 フェクション 95
 ドリップ 108
 ドリフト・ステップ・リカバリー・ダイオード
 20

な行

ナノ
 パルス放電 184
 秒パルス高電界 100
 ポア 93, 100
 難分解性物質 60
 二次電子 157
 二重らせん電極 125
 乳酸菌 129
 ネクロシス 99
 ネジ対平板電極 59
 根重量 132
 熱
 陰極 70
 核融合 207
 燃焼 183
 変動率 192

は行

バイオエレクトロクス 7
 バイポーラパルス 161
 バクテリオファージ 129
 波形成回路網 21
 針対平板電極間 54
 パルス
 圧縮 11

イオンビーム法 85
 高電界 93
細線放電法 86
 殺菌 123
 シャベナー 15
成形回路 198
 大電力 5
 トランス 73
 幅 87
 幅変調 202
 パワー・エレクトロニクス 17
 パワー科学 3
 パワー技術 3
 パワー工学 3
 パワー電源 3
パワーの特徴 4
 パワー発生装置 3
 フォーミングネットワーク 10
 フォーミングライン 13
 放電 79
 レーザ 192
 レーザー堆積法 85
 半導体
 オープニングスイッチ 20
 スイッチ 199
製造プロセス 174
 露光装置 6
 反応電子数 164
 光パワーメータ 56
 卑金属 85, 89, 91
 微生物捕集 111
 非破壊検査 178
 火花
 点火プラグ 193
 放電 149

非平衡

 プラズマ 157, 183

 プラズマ用点火プラグ 189

表面張力 61

頻度因子 169

ファージ粒子 130

ファイバ出力型半導体レーザ 193

不可逆エレクトロポレーション 99

不活性化 131

不整脈 94

フラーレン 160

プラズマ 57

 支援燃焼 183

 反応器 168

 メンブレンリアクター 167, 171

ブラックの回折 161

フリーラジカル 68

ブレオマイシン 98

フローティングカソード 189

分極測定 164

分光器 56

平板対平板電極 124

ポインティングベクトル 12

放射界 148

放射線

 応用技術 77

 障害防止法 75

放電

 開始遅れ時間 54

 開始電圧 51

 管 199

保持時間 128

ポストハーベスト 107

ポリアクリルアミドゲル電気泳動 116

ポリフェノール 139

抽出 116

ま行

マイクロ

 キャビティ 52

 トロン 72

波 190

 波プラズマ支援燃焼 191

 秒パルス高電界 95, 97

マグネトロン 178

マルクス型発生回路 201

ミキサー付点火プラグ 191

水カチオンラジカル 158

霧中放電 61

滅菌バリデーション 68

免疫系 103

や行

有機物被覆 87, 91

有効飛程 70

誘電体バリア放電 167

誘導

 エネルギー蓄積 185

 界 148

 性エネルギー 9

有用成分

 抽出 139

 ～の注入 141

輸送係数 211

溶菌 129

容量性エネルギー 9

ら行

ライフサイクル	130	流動モザイクモデル	124
ラインタイプ方式	198	両面照射	70
ラジカル	172	緑茶	127
リサイクルシステム	174	累積投入エネルギー密度	59
リサージュ	168	レーザー	
リポフェクション	95	共振器	193
粒径	86, 87	点火	192
粒子		点火プラグ	194
加速	206	ロードトロン	72
ビーム核融合	208	老化抑制	108
		六ホウ化ランタン	70
		= LaB6	

パルスパワーの基礎と産業応用

環境浄化、殺菌、材料合成、医療、農業、食品、生体、エネルギー

発行日 2019年8月12日 初版第一刷発行
監修者 堀越 智
発行者 吉田 隆
発行所 株式会社 エヌ・ティー・エス
〒102-0091 東京都千代田区北の丸公園 2-1 科学技術館 2階
TEL.03-5224-5430 <http://www.nts-book.co.jp>
印刷・製本 倉敷印刷株式会社

非売品

©2019 堀越智, 秋山秀典, 江偉華, 徳地明, 門脇一則, 吉田昌弘, 佐々木満, 末松久幸, 鈴木常生, 菅島健太, 中山忠親, 新原皓一, 矢野憲一, 諸富桂子, 高木浩一, 猪原哲, 大嶋孝之, 南谷靖史, 馬杉正男, 齋藤永宏, 石崎貴裕, 牟田幸浩, 蔡尚佑, 神原信志, 早川幸男, 豊川弘之, 田上公俊, 森吉泰生, 堀田栄喜, 明本光生, 堀岡一彦.

落丁・乱丁本はお取り替えいたします。無断複写・転写を禁じます。
本書の内容に関し追加・訂正情報が生じた場合は、(株)エヌ・ティー・エスホームページにて掲載いたします。
※ホームページを閲覧する環境のない方は、当社営業部(03-5224-5430)へお問い合わせください。