水中における高電圧パルス電界・放電の発生と利用
～バイオ・水処理～

群馬大学大学院工学研究科
環境プロセス工学専攻
准教授　大嶋 孝之

研究背景

なぜ（なんのために）この研究を行っているか

高電圧技術の水系への応用

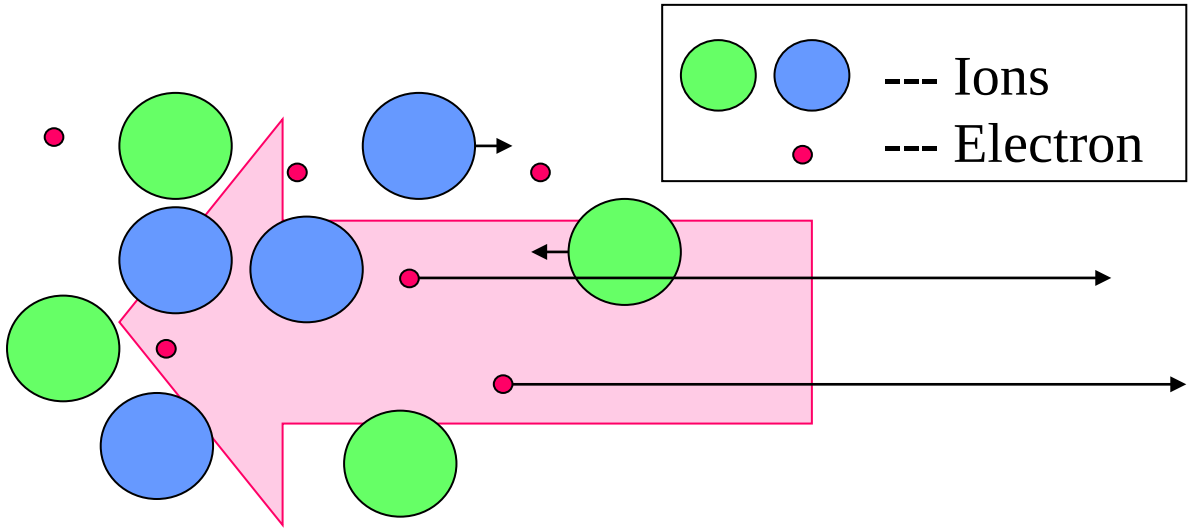
⇒ターゲットはバクテリア、ウイルス、化合物

- ◆ 安全な水および飲料水の提供
- ◆ 非加熱殺菌による新規液状食品の提案
- ◆ 水資源の有効利用
- ◆ 高度水処理
- ◆ 特に電気のみ添加物なしでどこまでできるか

Pulsed Electric Field（PEF）とは何?

AC や DC 高電圧は水中において放電プラズマを作ることは困難。
←水中ではイオン種が多すぎる。

印加時間数μmの高電圧パルス電圧を水中で印加すると どういう現象が生じるか？

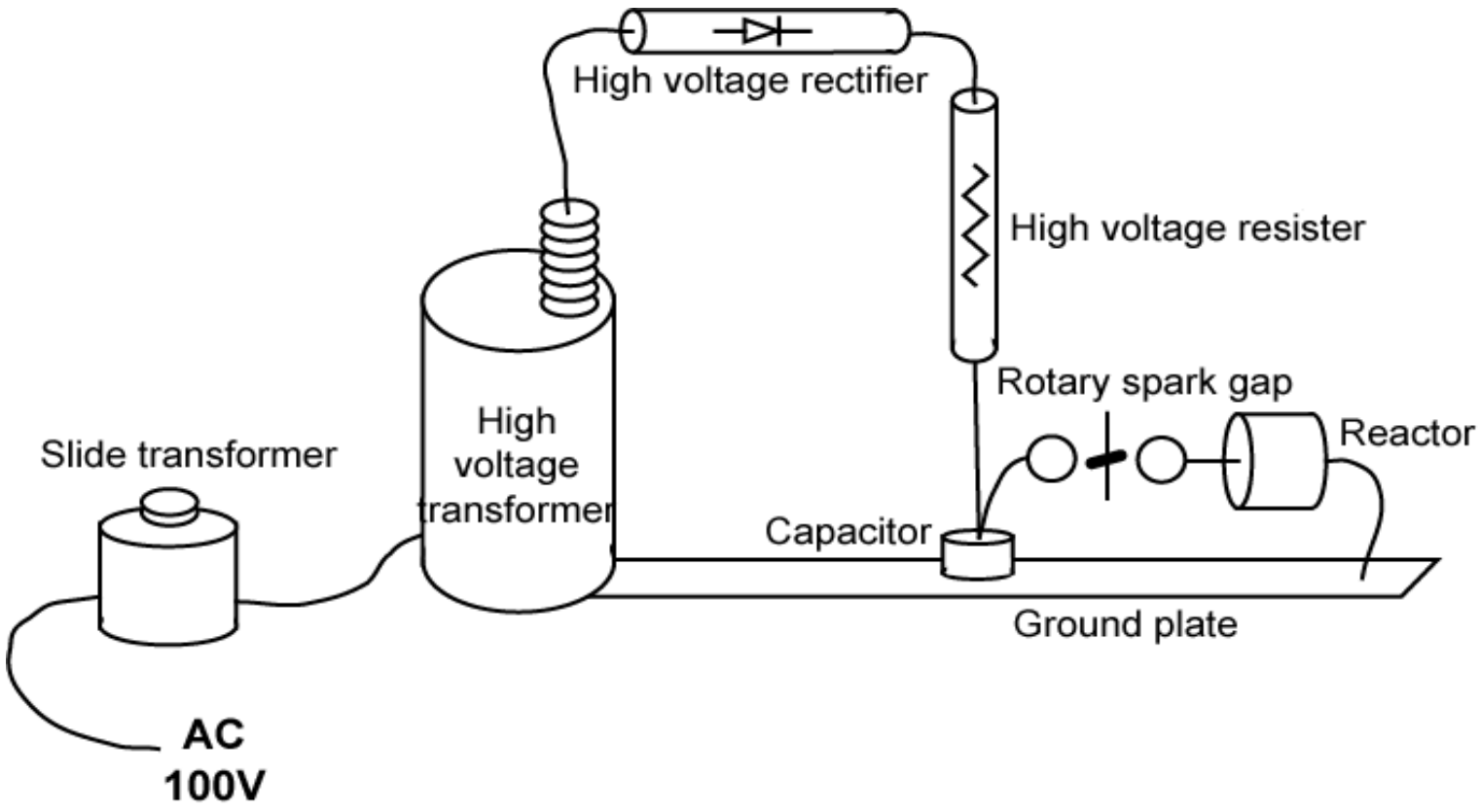


非常に短時間の高電圧（パルス条高電圧）を印加した場合、電子は電圧に伴い移動できるが、電子に比べて大きなイオン種は移動することができない。

→ この現象のバイオテクノロジーへの応用 = 私たちの研究目的
バクテリアの不活化（殺菌）は最もよく知られた現象。

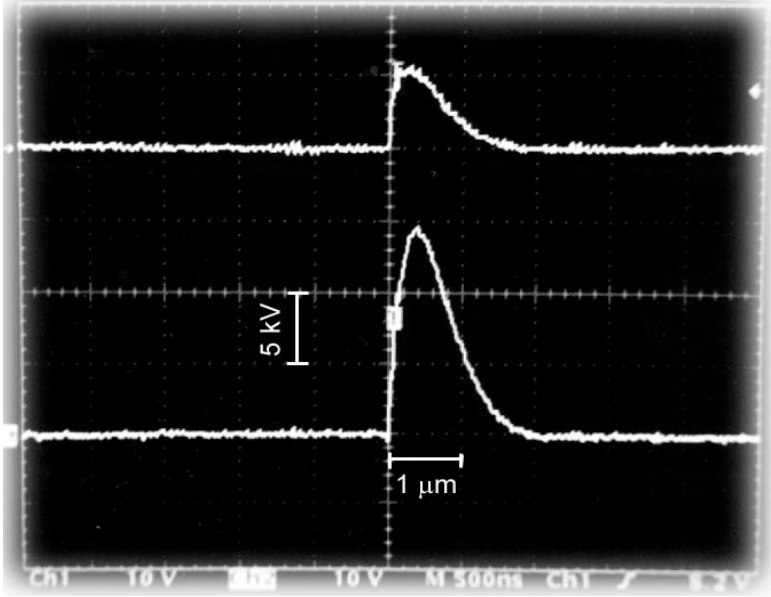
高電圧パルスはどのように発生させるか?

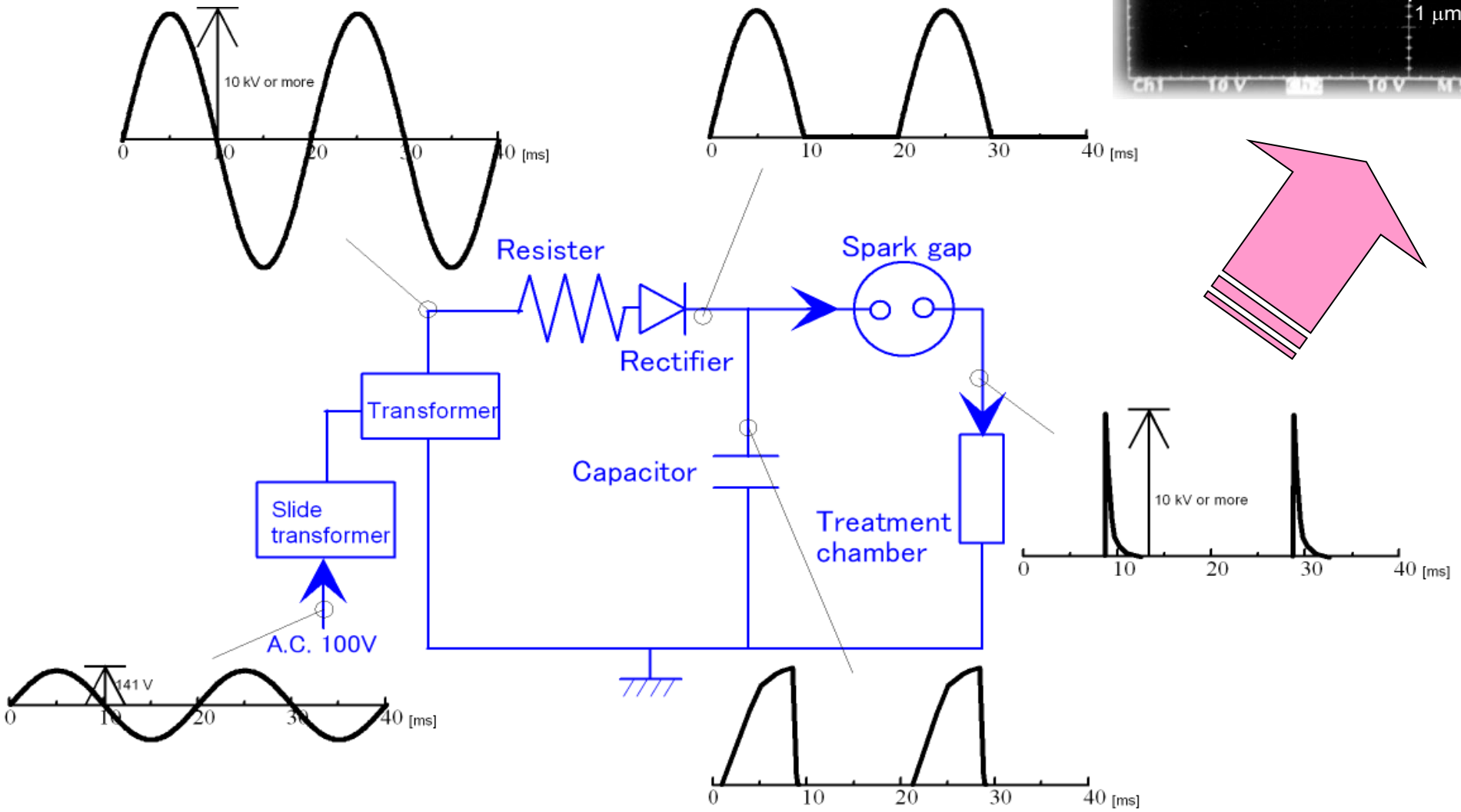
Capacitor discharge type pulse generator
(Typical pulse generator in our laboratory)



- 電気エネルギーがコンデンサーに充電される。
- スパークギャップを通して蓄えられていた電荷が放出される。
- パルス周波数:
  25, 50 Hz
- ピーク電圧:
  5~25 kV
- ピーク昇圧時間:
  30~60 ns
- パルス幅は溶液の導電率に依存する。(500 ns~50 μs).

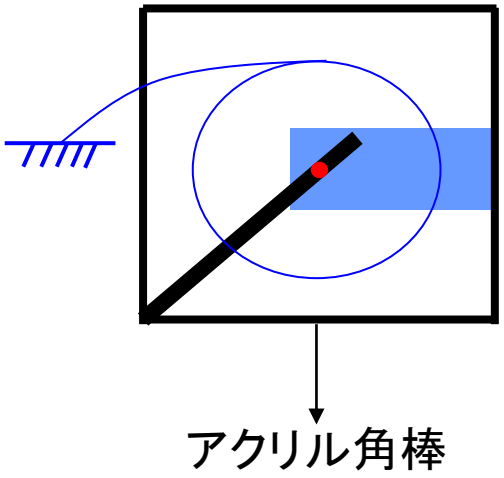
スパークギャップを用いた高電圧パルスの発生



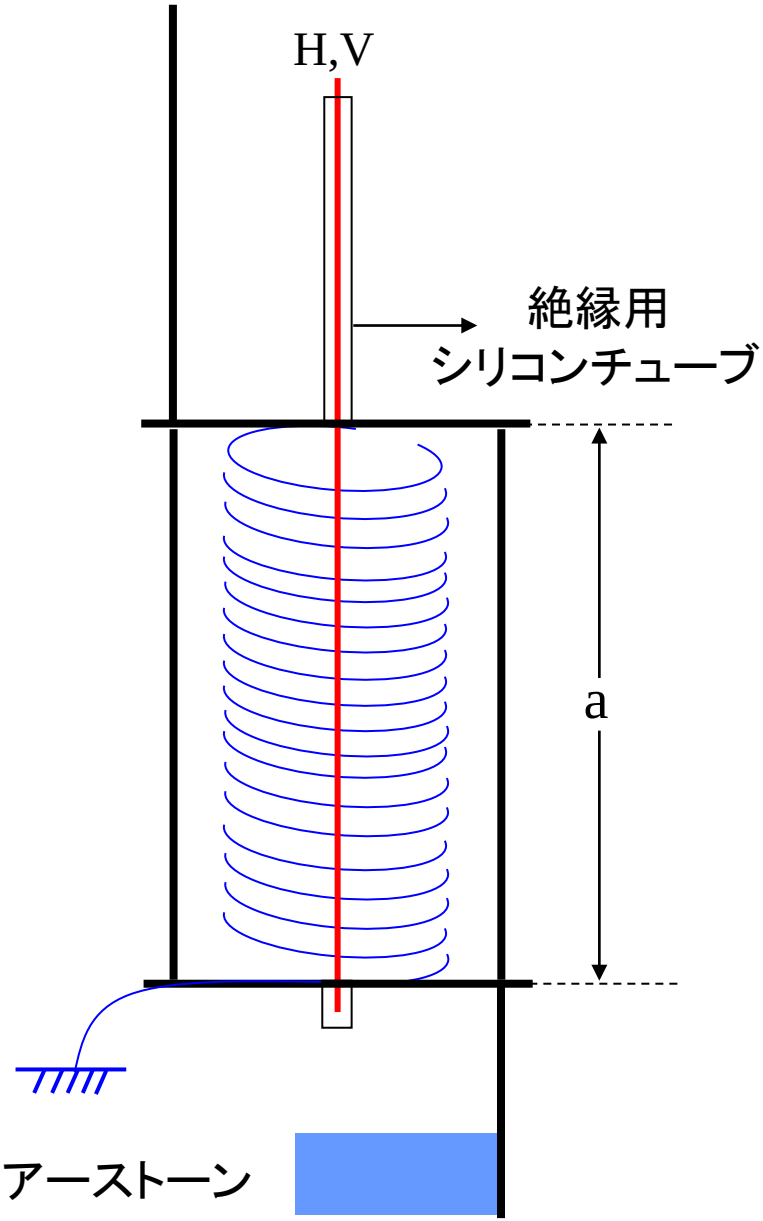


水中パルス放電を発生させるための電極

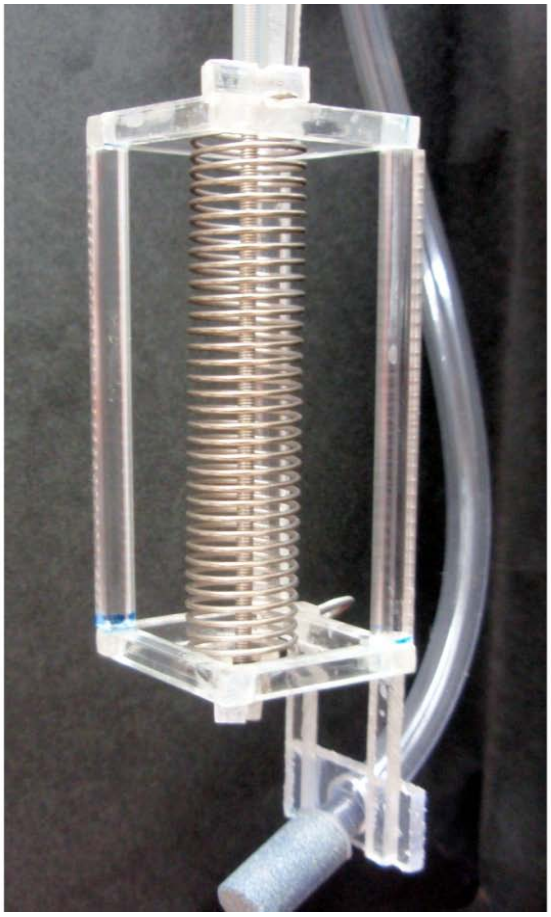
上から見た図



横から見た図



電極の写真



電極の条件

高電圧電極：ステンレスねじ

アース電極：ステンレスワイヤー

印加電圧：約20 kV

ねじ径：3.0 mmϕ

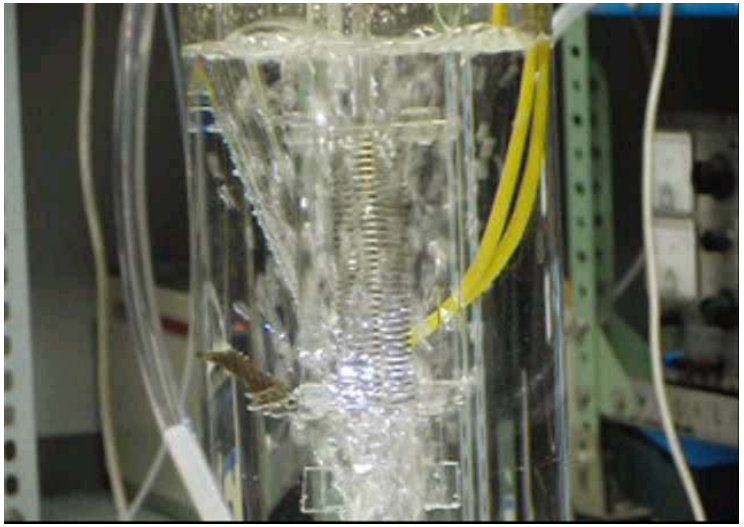
ワイヤー径：1.0 mmϕ

電極間距離：6 mm

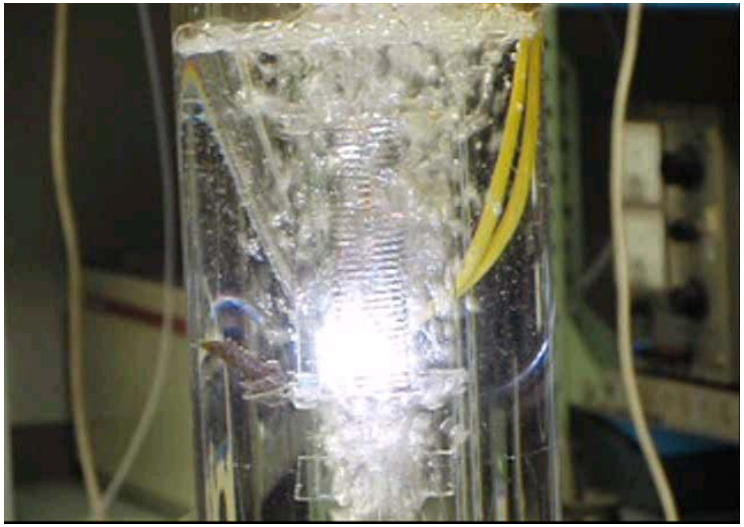
a：80 mm

バブルの供給と放電プラズマの発生

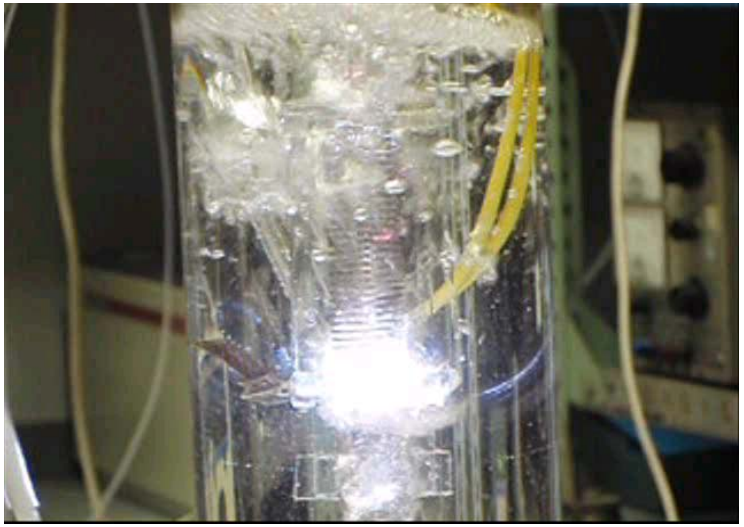
エアー流量の違いによる放電の様子



2 L/min



4 L/min



6 L/min

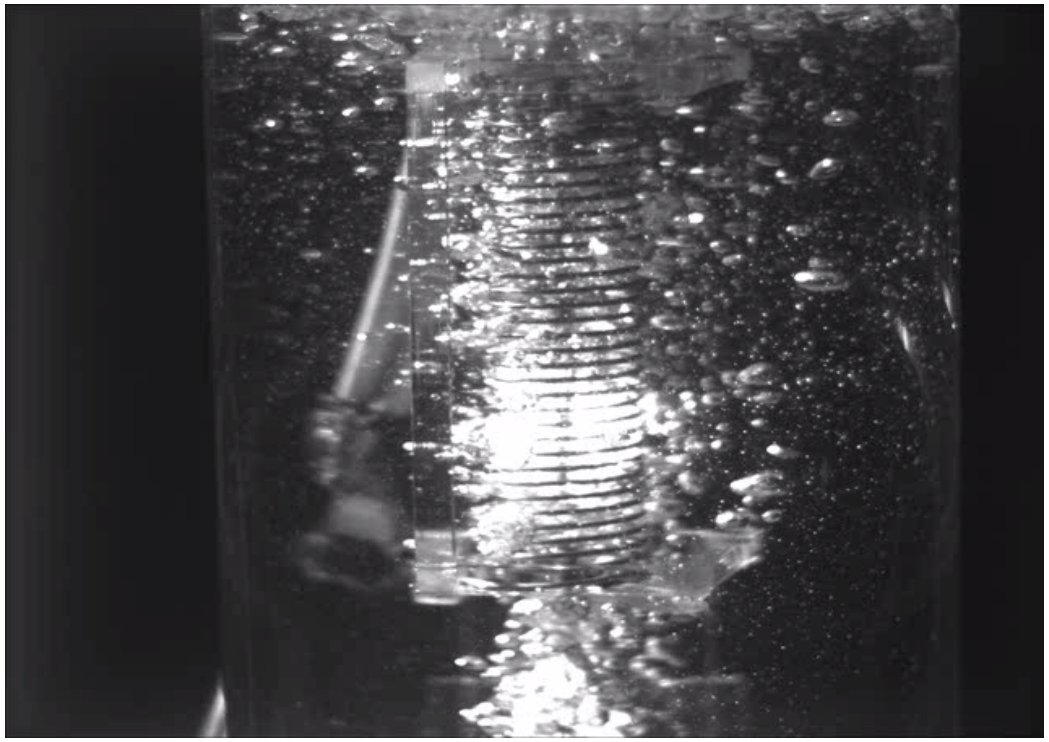
放電の激しさはAir流量に依存する

放電はどのように流量に依存するのか

電極の場所でどのように違いがあるか

高速度カメラを用いて放電の定量化を行った

高速度カメラを用いた放電の撮影



動画は1 sを1/10倍速でスロー再生したもの、エアー流量4 L/min

装置条件

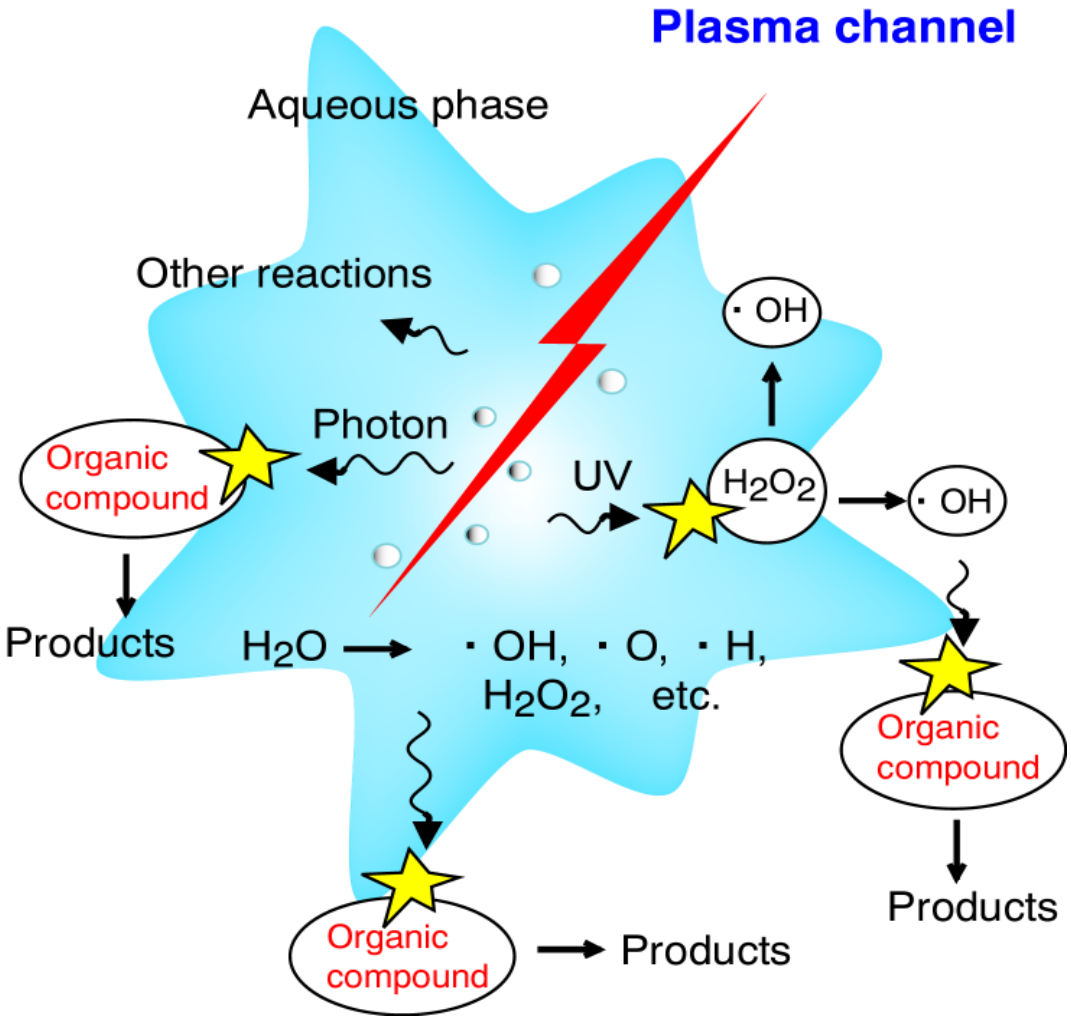
印加電圧：20 kV
周波数：333 Hz
高電圧棒：ステンレスねじ
エアー流量：2,4,6 L/min

撮影条件

高速度カメラ：HOT SHOT 1280
（株式会社ナックテクノロジー）
シャッタースピード：1/1000 s
フレームレート：1000 [-]

パソコン上で1コマずつ放電の様子が確認可能

放電プラズマの発生と作用



◆放電プラズマチャンネルとその近傍では様々な作用が期待できる

||

有効な範囲は放電プラズマ近傍のみ。
殺菌に関しても放電の近傍しか期待できない。

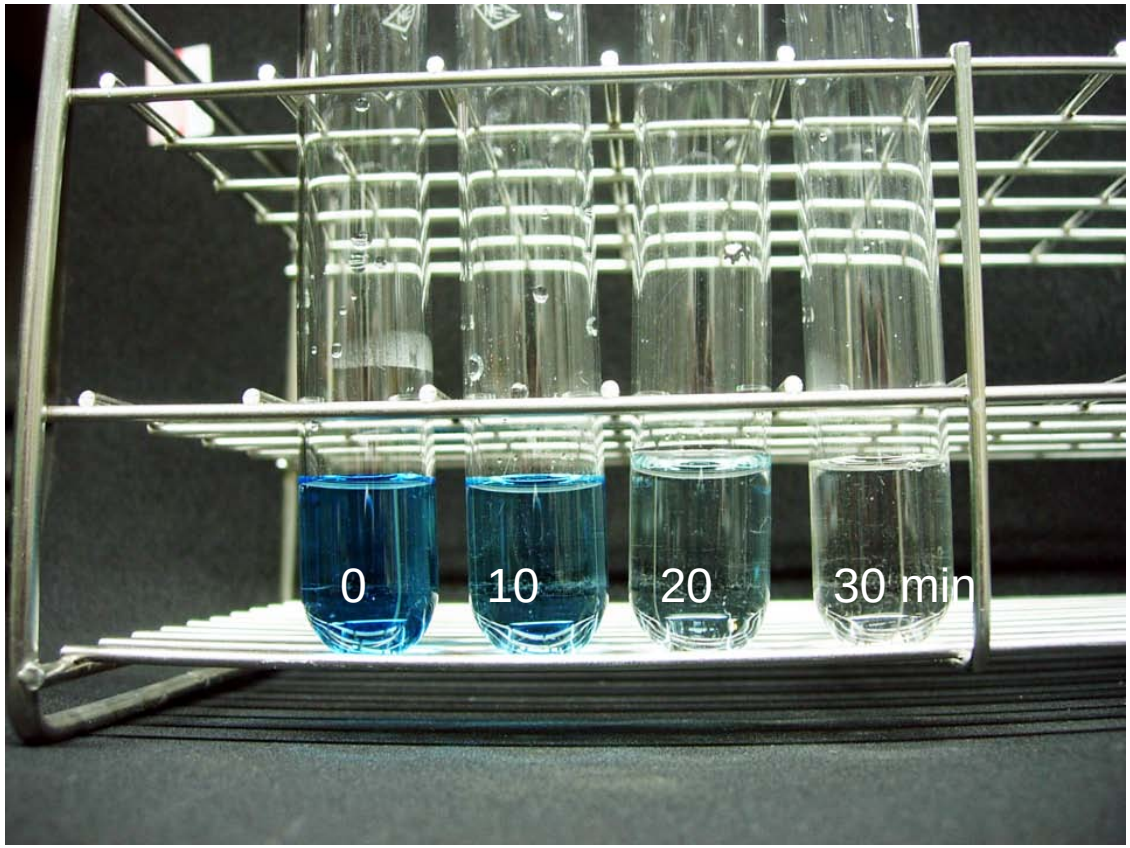
◆水中で直接AOPsが可能
（AOP:Advanced Oxidation Process)

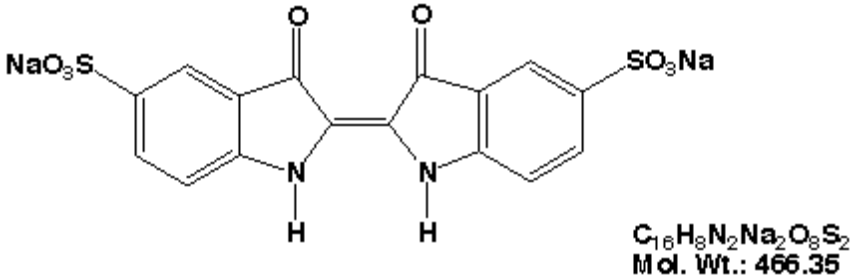
||

様々な未知の過酸化物が残存する可能性がある。
我々に有用な有機物質まで分解していしまう可能性がある。

放電プラズマを直接食品に使用することは困難？危険性がある？
廃水処理や景観水の浄化には使用できる？

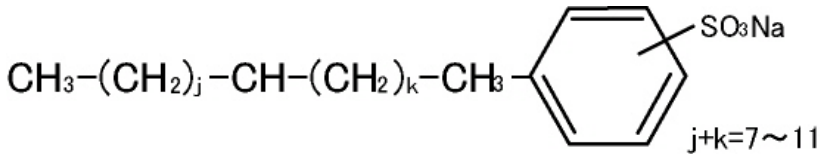
インディゴカルミン (0.01 g/L) の放電プラズマ脱色



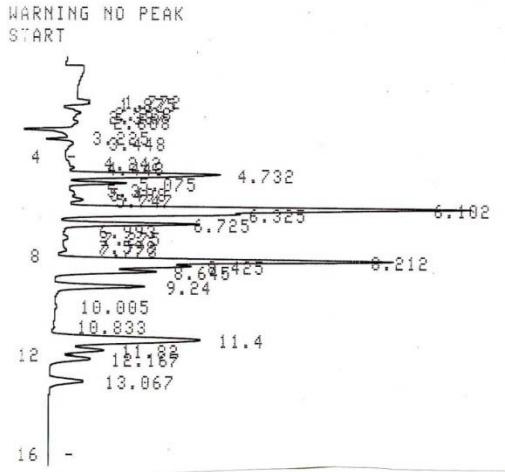


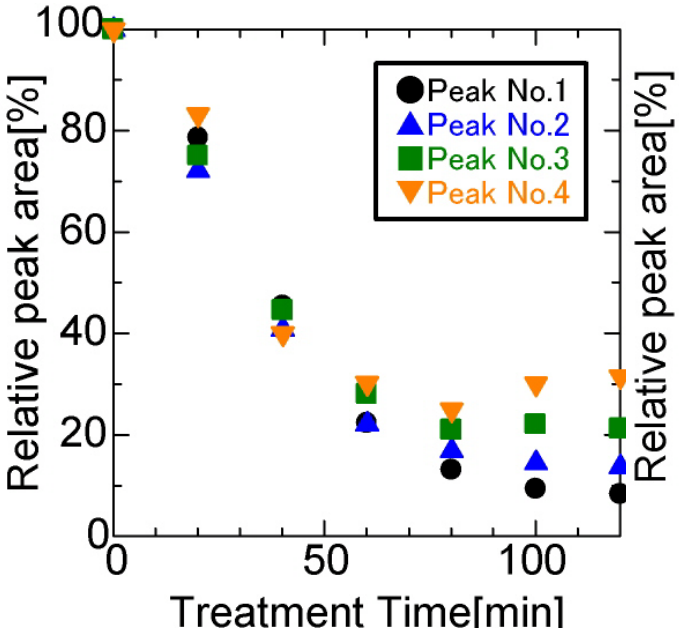
- 水中では高速電子により様々な活性種が生成される。
- 主要なラジカルは·OH
- 活性種が水中の有機物を分解除去する。
- このような水中放電プラズマは水中微生物の殺菌にも応用できる。

ストリーマ放電によるLASの分解

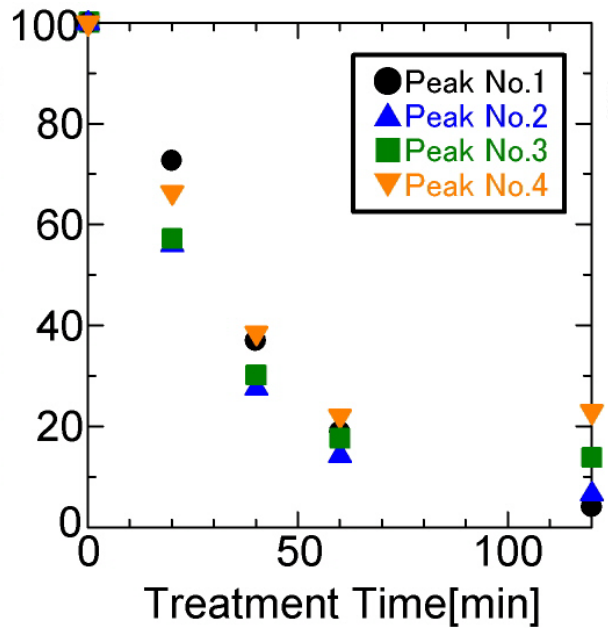


直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウム
(LAS)

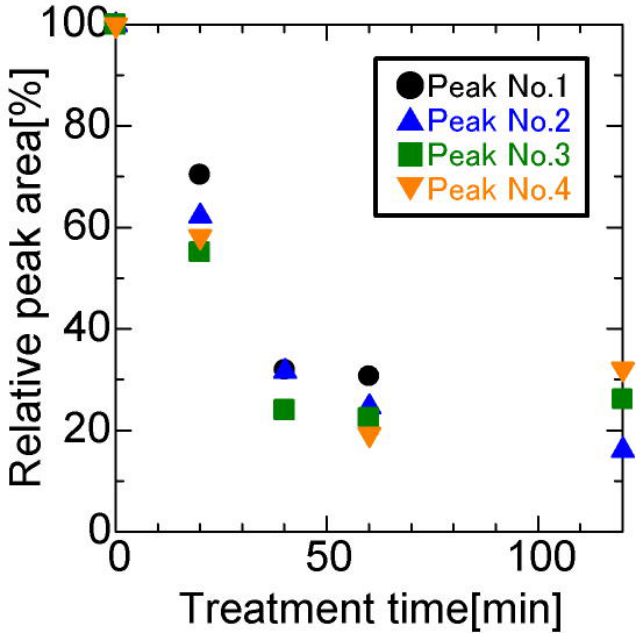




10 mg/L

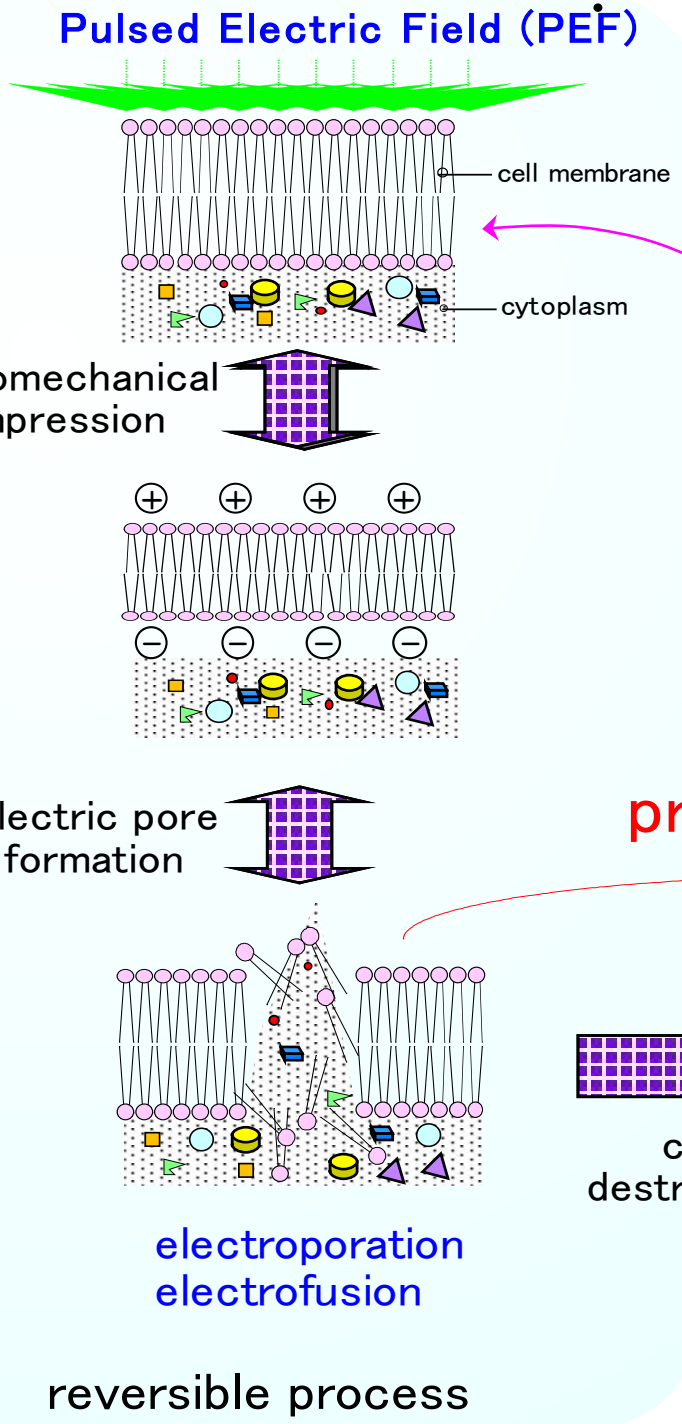


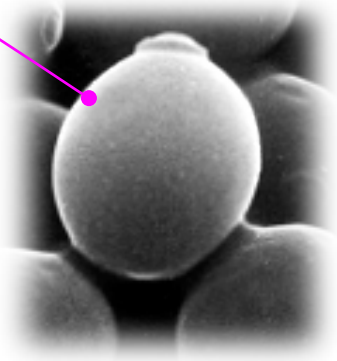
50 mg/L



100 mg/L

PEFによる細胞膜の破壊





- 細胞膜内外に電位差が生じる。

$$V_m = 1.5aE\cos\theta$$

- V_m : Voltage difference between membrane
- a : Cell radius
- E : Field strength
- θ : Angle from field line

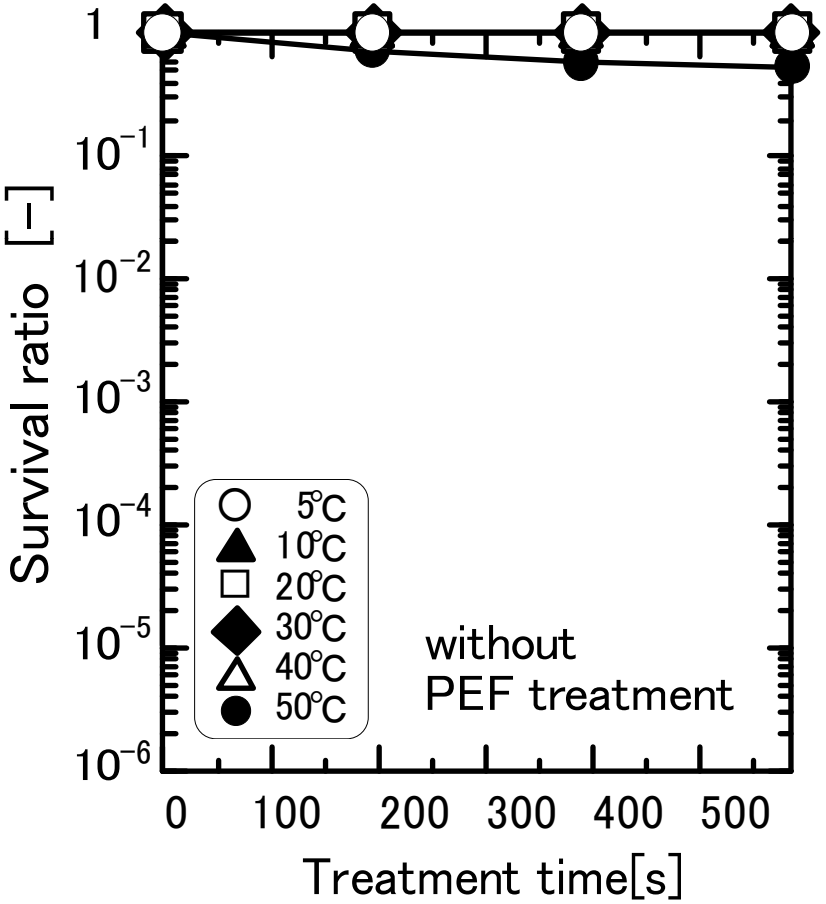
細胞膜の破壊に必要な細胞膜内外の電位差はおよそ1V。

V_c=1 V

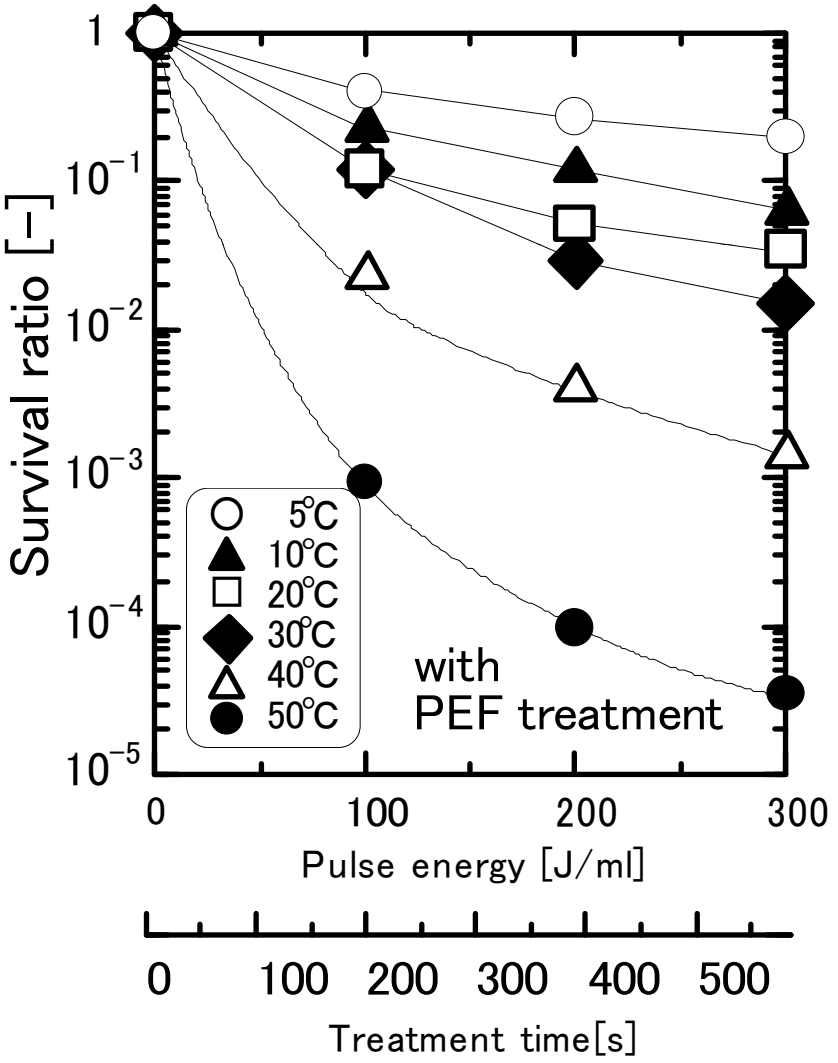
- V_C: critical voltage

PEF殺菌～処理温度の影響～

(*S. cerevisiae*)



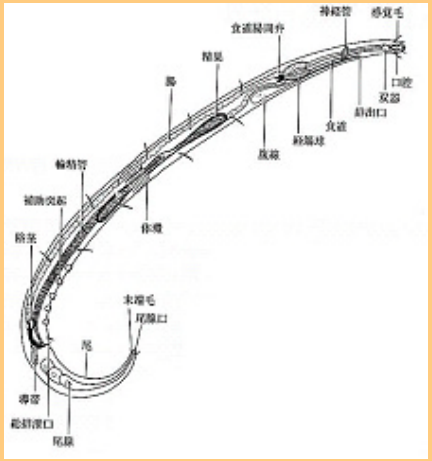
without PEF



with PEF
(plate to plate electrode,
12 kVcm, 50 Hz)

植物寄生線虫とは

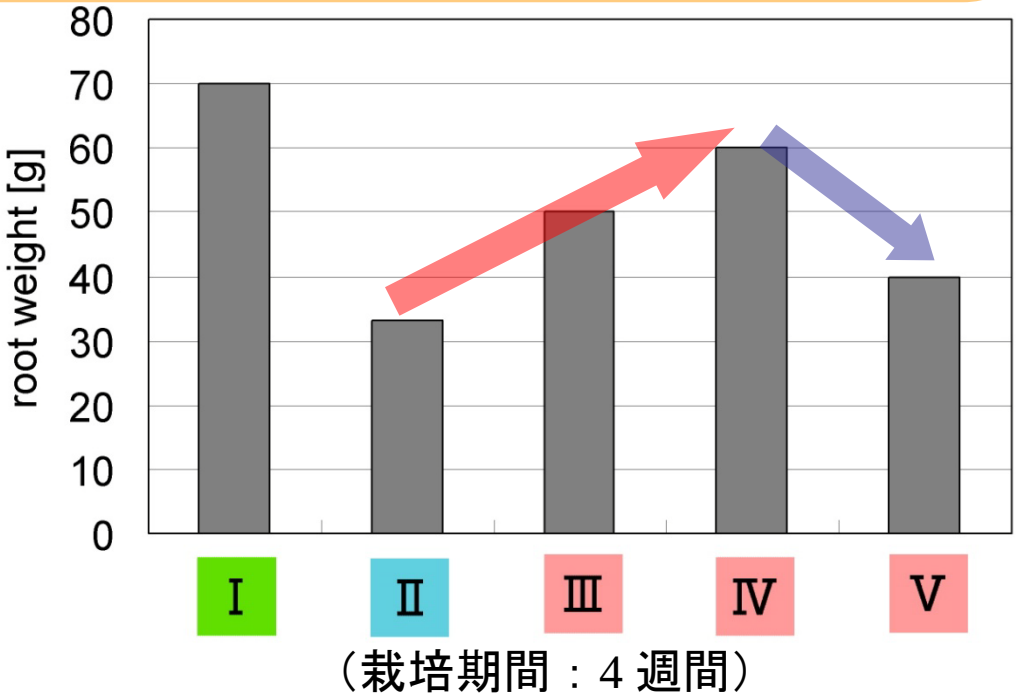
- 英名をnematodeと言い、「糸のようなもの」の意味を持つ細長い体の寄生虫
- 畑などに多く存在し、植物の根から養分を得て増殖
- 頭部の先端にストローのような細長い吸収口（口針）をもち、これにより養分の吸収を行う



高電圧パルス処理による線虫被害低減

Ⅱ：寄生後、未処理
Ⅳ：5 kVp,10sec印加
（栽培期間：7 週間）

Ⅱ：寄生後、未処理
Ⅳ：5 kVp,10sec印加
（栽培期間：7週間）



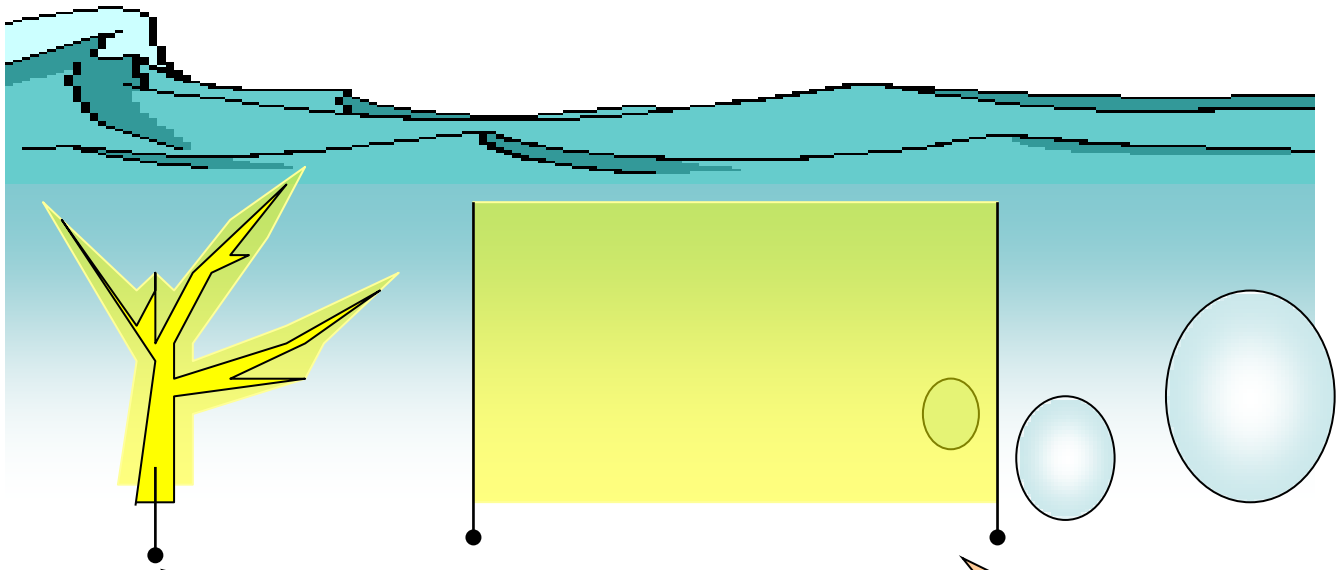
（栽培期間：4 週間）

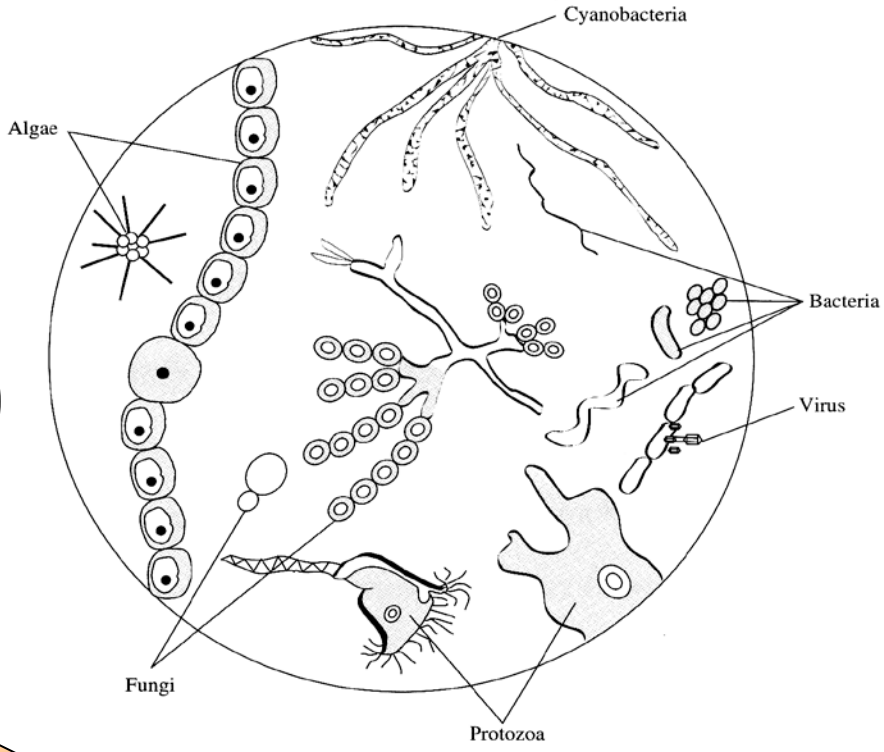
・高電圧パルスを印加したトマト（Ⅲ～Ⅴ）の根重量は、線虫未混入（Ⅰ）のものには及ばないものの寄生後、未処理のもの（Ⅱ）と比べ根重量の増加が見られた。

・特に、5 kV の場合（Ⅳ）が有効であった。

放電プラズマ？or PEF？

高電圧パルスは大気圧下水中でのように作用するか？





放電プラズマ
放電プラズマチャンネルおよび近傍ではバクテリアの殺菌が可能。
＝作用範囲は狭い。

PEF は電界“場”の作用であるため、電極間の領域で均一な殺菌作用が期待できる。
= 作用範囲は広い

PEF のほうが水中のバクテリア殺菌に適しているのではないか

パルス電界と放電プラズマの作用

電極間で一様に作用＝
作用範囲が広い
エネルギー効率の改善
が必要

タンパク質をはじめとす
る有機物の分解は確認
されていない

DNAやRNAは
切断される？

	殺菌	有機物分解	化学反応
パルス電界	◎	×※	×※
放電プラズマ	○	○	○

※電気化学的な
電極反応はあり

作用範囲の狭さ＝効率
の悪さ
殺菌だけを目的とするに
は強力すぎる？

化学種を選ばない反応性
要エネルギー効率
要リアクターの開発

ラジカル重合の促進
硝酸、リン酸など低分子
イオンも反応？

従来技術とその問題点1

殺菌操作について

〇乳及び乳製品の成分規格等に関する省令に基づく表示について（抜粋）

(昭和六〇年七月八日)(衛乳第二九号)

4　殺菌温度及び時間

牛乳、特別牛乳、殺菌山羊乳、部分脱脂乳、脱脂乳及び加工乳にあっては、殺菌温度及び時間を表示すること。また、殺菌しない特別牛乳にあってはその旨を表示すること。

(1)　殺菌温度

ア　温度は摂氏温度であらわし、「摂氏〇〇度」又は「〇〇℃」と記載すること。

イ　温度は、当該処理場で行っている実際の殺菌温度を正確に記載すること。

(ア)　摂氏六二度から六五度までの間で加熱殺菌するものにあっては、「六二℃～六五℃」又は「六二～六五℃」と記載して差し支えないこと。

(イ)　摂氏七五度以上で加熱殺菌するものにあっては、「八五℃」、「一三二℃」等と当該処理場で行っている実際の殺菌温度を記載し、「七五℃以上」、「一三〇℃以上」等と記載しないこと。

(2)　殺菌時間

ア　時間は、「分」又は「秒」で表わし、分を「′」、「m」、「min」等、秒を「″」、「s」、「sec」等と記載しないこと。

イ　時間は、「一五分間」、「二秒間」のように当該処理場で行っている実際の殺菌時間を正確に記載し、「一五分間以上」、「二秒間以上」等と記載しないこと。

(3)　殺菌温度、殺菌時間を表わすものであることを明らかにするため、「殺菌」、「殺菌温度」、「殺菌時間」等の文字を前又は後に記載すること。

(例)「六五度C三〇分間殺菌」

「殺菌温度一三〇℃、殺菌時間二秒」

現在流通している食品の大部分は加熱殺菌済み

＝本来の風味・味わいを失っている

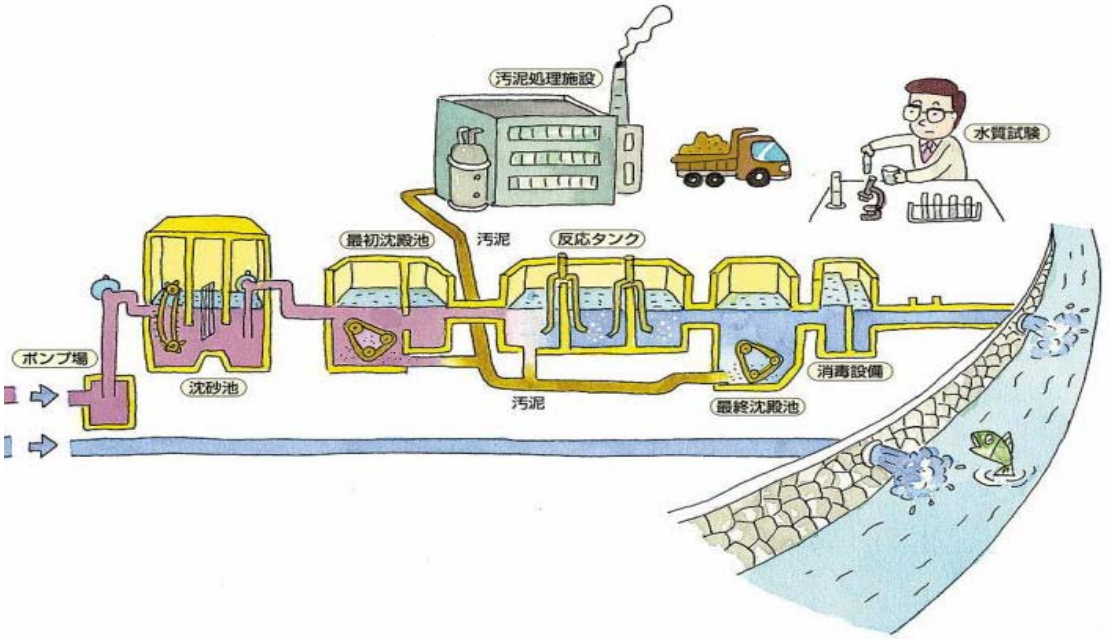
⇒非加熱パルス殺菌は新しい飲料の創生につながる。

⇒ご当地、新鮮など付加価値の高い液状食品

従来技術とその問題点2

水処理（廃水処理）について

活性汚泥とは、人為的・工学的に培養・育成された好気性微生物群を主成分とする「生きた」浮遊性有機汚泥の総称であり、排水・汚水の浄化手段として下水処理場、し尿処理場、浄化槽ほかで広く利用されている。



現在の廃水処理は活性汚泥法をはじめとする微生物を利用した浄化方法が基本となっている。

＝反応時間が長い。

＝毒性のある化合物の処理は困難。

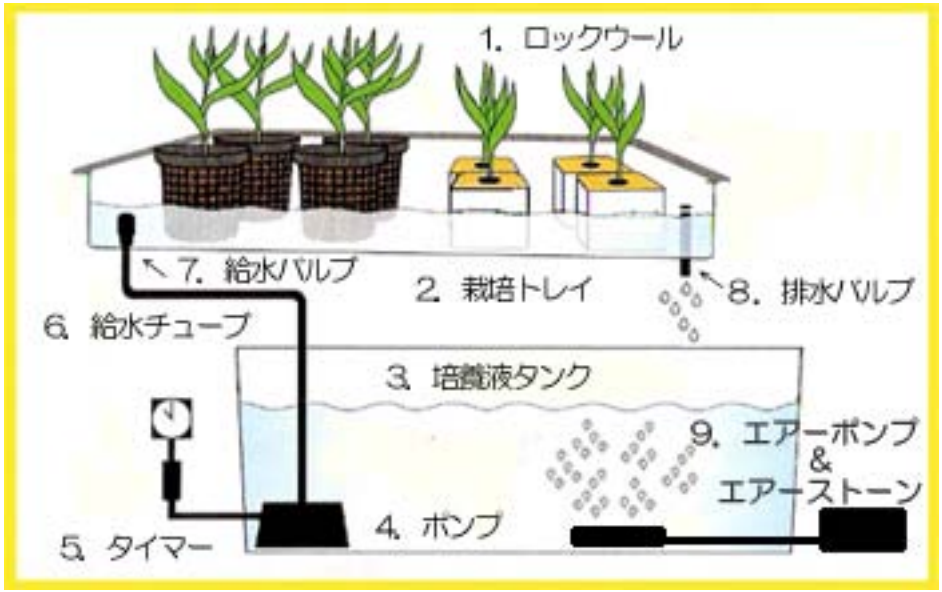
＝余剰汚泥の処理。

⇒水中プラズマは一部の水処理に利用可能

従来技術とその問題点3

農業について

ダイズシストセンチュウ



農業に関するトピックス

・線虫をはじめとする病原性微生物による被害

・水耕栽培（植物工場）

現在、農業の効率化、工業化が求められている。

＝農薬や肥料の過剰供給、分散。

＝天候不順による収穫量減。

＝植物工場は病害虫のリスクも高い。

⇒水中プラズマやパルス殺菌は農業問題にも応用可能

想定される業界

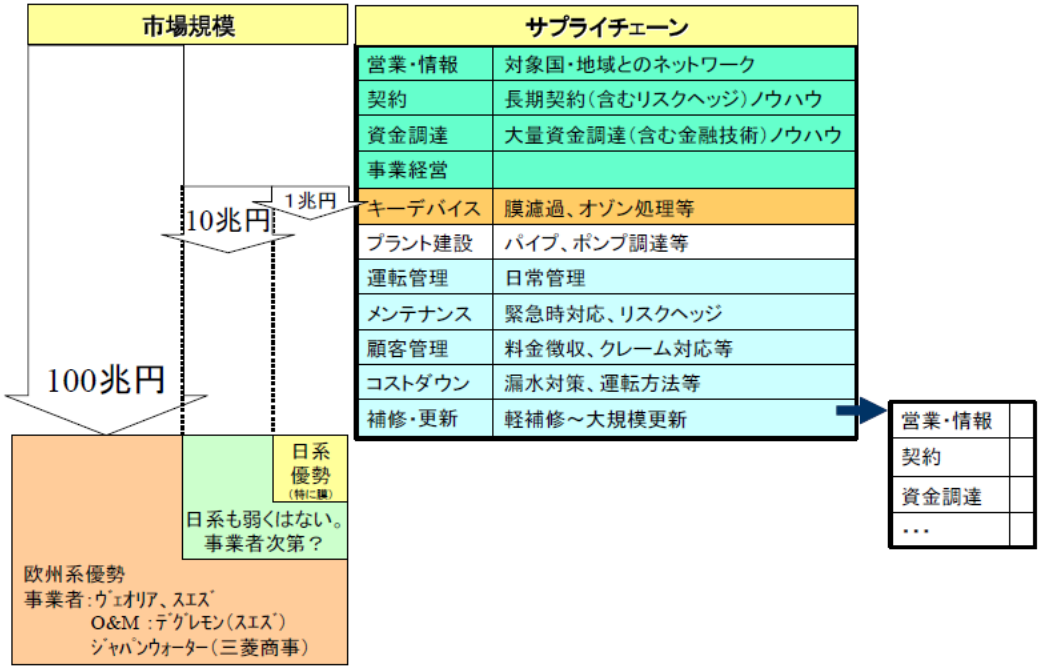
- 利用者・対象

  上下水について困っている企業・業界

  微生物被害で困っている企業・業界

  水ビジネスに興味のある方

- 市場規模

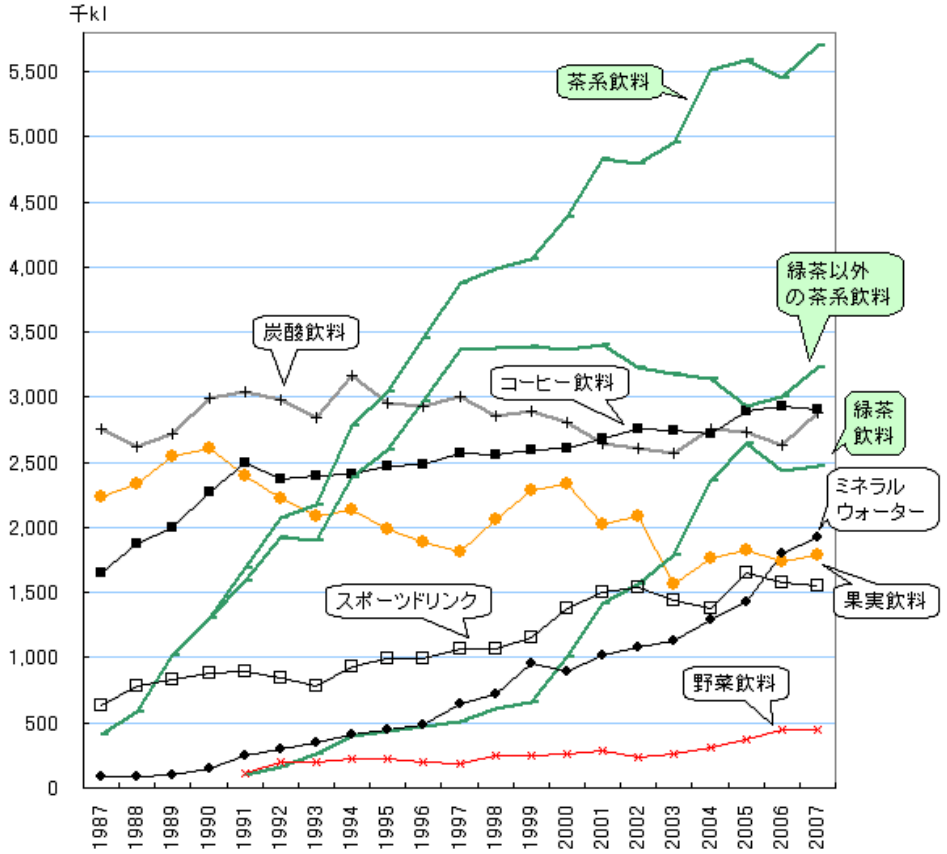


サプライチェーン	
営業・情報	対象国・地域とのネットワーク
契約	長期契約（含むリスクヘッジ）ノウハウ
資金調達	大量資金調達（含む金融技術）ノウハウ
事業経営	
キーデバイス	膜濾過、オゾン処理等
プラント建設	パイプ、ポンプ調達等
運転管理	日常管理
メンテナンス	緊急時対応、リスクヘッジ
顧客管理	料金徴収、クレーム対応等
コストダウン	漏水対策、運転方法等
補修・更新	軽補修～大規模更新

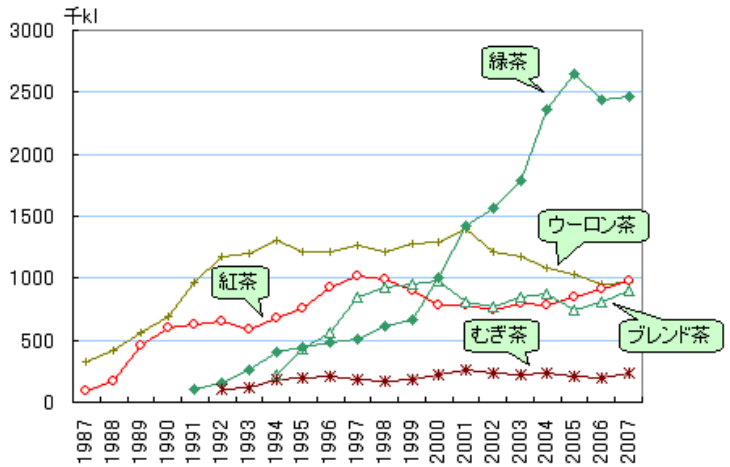
営業・情報
契約
資金調達
・・・

出所）産業競争力懇談会（COCN）「水処理と水資源の有効活用技術プロジェクト報告書」を参考に作成

清涼飲料の生産推移



茶系飲料の内訳の推移



（注）年度ベース

（資料）全国清涼飲料工業会

2007年度茶系飲料の市場規模は4352億円

実用化に向けた課題

バイオ・プラズマプロセス研究委員会活動方針
委員長：　水野　彰　（豊橋技術科学大学）
幹　事：　大嶋　孝之（群馬大学）

大気圧非平衡プラズマは，バイオ分野においても幅広い応用が期待できる。本研究委員会では以下のような調査検討を行いたい。なお、静電気分野の研究者に加え、関連分野の研究者を招待してシンポジウムあるいは研究会を開き、国内及び海外での動向などの調査・検討を進める。

1．環境中の菌・ウイルスの制御
　感染経路などの調査、
　非平衡プラズマによる殺菌・ウイルス不活化効果とそのメカニズムの調査
　空気清浄装置の効果検証方法の標準化
2．環境中のバイオ粒子の計測技術
　リアルタイムモニタリングの可能性の検討

研究委員会設置期間：平成 22 年 1 月～平成 23 年 12 月まで
年間計画：年 2 回程度研究委員会を開催する。
御礼：本委員会の趣旨にご賛同いただいた企業から支援金をいただいております。厚く御礼申し上げます。会員外の講師招聘等に使わせていただきます。

静電気学会研究会より

- 基本的に基礎研究レベル。電気だけでどこまでできるか？
- それぞれの個別の課題についてチューニングが必要
- 水中プラズマは近年盛んに研究され始めている（静電気学会、電気学会など）

企業への期待

- 価格の高い液状商品の品質管理に問題を抱えている企業との共同研究を希望。
- 主に限外ろ過膜製造の技術を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、植物工場を開発中の企業、水ビジネス分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。
- 研究開発に理解のある方。

お問い合わせ先

■ 群馬大学大学院工学研究科
環境プロセス工学専攻
准教授　大嶋 孝之
e-mail：tohshima@cee.gunma-u.ac.jp

■ 群馬大学TLO
e-mail：rip-admin@eng.gunma-u.ac.jp
TEL　0277-30-1171～1175

■ 群馬大学共同研究イノベーションセンター
e-mail：innovation@jimu.gunma-u.ac.jp
TEL　0277-30-1181～1183，1188、1669