◇◇◇ 解説記事 ◇◇◇

ミニマムヒーティングプロセスを利用した加工食品のおいしさと安全性の追求

植　村　邦　彦

（国研）農業・食品産業技術総合研究機構

1. は　じ　め　に

食品の微生物汚染に起因する食中毒事故が毎年のように発生し，社会問題となっている．食品の調理，殺菌としては，火を使った調理から始まり，様々な熱源で外部から加熱する外部加熱が行われてきた．一般的な微生物は，加熱により殺菌されるが，食品中の熱に弱い有用な成分が同時に変性してしまうことが問題である．1900年頃から電気を使った通電加熱（ジュール加熱）が利用されるようになった．通電加熱とは，食品に電圧を加えた場合，食品内部のイオンなどが媒体となって電流が流れる．流れた電流の二乗に比例する電気エネルギーが熱エネルギーに変わって食品自身が発熱することを利用した内部加熱方法である．通電加熱に用いる電源の周波数は，当初，50 Hzや60 Hzの商用の低周波の交流であったが，電極と食品の接触面で電極の腐食や食品の電気分解が問題となったため，現在では，20 kHz以上の高い周波数の交流が用いられるようになってきた．さらに，筆者らは20 kHzの周波数で，1,000 V以上の高電圧の交流を用いた交流高電界と呼ばれる技術を開発し，果汁の様な低粘度の液体食品の高品質な殺菌方法として実用化してきた．また，さらに高い周波数である3 MHz～30 MHzの短波帯の周波数の交流を用いることで，たんぱく質を含んだ液体食品の連続通電加熱やプラスチック包装された固体食品の加熱への応用展開が進められている．外部加熱は食品の中心部が目的の温度に達するまで，外部から長時間加熱する必要があるのに対して，交流電界を用いた内部加熱は，食品を内部から均一に発熱する特徴を持つため，食品の中心部を短時間で昇温することが可能である．したがって，この内部加熱を利用することで食品の殺菌に必要な加熱時間を短縮し，有用な食品成分の熱変性を低減することが可能である．このように交流電界を用いることにより，最小の加熱時間で殺菌を実現する方法をミニマムヒーティングプロセスと呼ぶことにし，本稿では，各種の食品に対応したミニマムヒーティングプロセスについて具体例を示す．

著者略歴

植村邦彦

昭和62年　農林水産省食品総合研究所入所

平成15年　農林水産省総合食料局　技術指導官

平成17年　独立行政法人食品総合研究所　チーム長

平成18年　農研機構食品総合研究所　ユニット長

平成28年　農研機構食品研究部門　ユニット長

現在に至る略歴等

〒305-8642　つくば市観音台2-1-12

Fax: 029-838-8122, E-mail: Uemura@affrc.go.jp

2. ジュール加熱による味噌の殺菌

ジュール加熱とは，一般に30 kHz以下の周波数の交流を用いた食品の加熱方法である．食品を2枚の平行平板電極間に挟み，両電極に外部から交流電界を印加した場合，食品内部には電界の方向に沿って電界に比例した交流電流が流れようとするが，食品中で電気を運ぶイオンの移動遅延や摩擦が電気的な抵抗に換算され，流れた電流の二乗と生じた抵抗に比例した電気エネルギーが熱エネルギーとなって材料自身が発熱する．ジュール加熱による殺菌は，あくまでも自己発熱による熱の効果による殺菌であり，電気的な殺菌効果は明確ではない．以下に，ジュール加熱の一例として，連続通電加熱による味噌の殺菌および酵素失活について述べる．

味噌はわが国の伝統的な食材であるが，年々国内消費が減少している．その理由として，塩分濃度が高いため喫食を控えることや，出汁を取るのに手間がかかることである．これに対応するため，塩分の添加を低減した減塩味噌が市販されているが，塩分を低下させた味噌は微生物が増殖しやすくなるため，通常の味噌以上に十分な殺菌を行う必要がある．また，味噌に出汁をあらかじめ加えた出汁入り味噌が販売されているが，出汁の成分である核酸は味噌麹に含まれる酵素フォスファターゼによって分解されるため，出汁を添加する前に，味噌の酵素を失活しておく必要がある．以上の理由より，味噌を加熱することが必要になっているが，味噌は粘度が高く，熱伝達が悪いため，長時間の

© 2019 Japan Society for Food Engineering

加熱による味噌の褐変と香気成分の変化が問題である．そこで，連続通電加熱により，加熱時間の短縮を目指した．

高粘度のペースト状食品である味噌を背圧に抗して，押し出すために強力なポンプが必要となる．図 1 に示す連続通電加熱装置により，味噌を通電加熱した．電極は，7 個のリング電極と電極に挟まれる 6 個の樹脂管で構成され，7 個の電極には交互に交流電界が給電される．リング電極の内側を流れる味噌内部は図 2 に示すように電気力線に沿って，電流が流れ，味噌が発熱する．また，味噌の中心部と外側を比べると，外側の方が電気力線の密度が高く，外側の温度が高くなるが，リングの内径（D）と電極間距離（L）の比（L/D）を 3 以上とすることにより，味噌の中心部と外側の温度差が減少し，均一加熱を実現できる [1]．連続通電加熱による味噌の温度は，4 秒間の通電加熱で 95℃まで昇温し，4 秒間温度保持後，直ちに冷却した（図 3）．このとき，味噌に添加した枯草菌芽胞は 1/500 に低減した（表 1）[2]．味噌に含まれる酵素フォスファターゼは，4 秒間の連続通電加熱で 65℃まで昇温した場合，94％失活した．結果として，通電加熱は通常加熱に比べて 10℃程度低い温度で失活したことがわかった [3]．

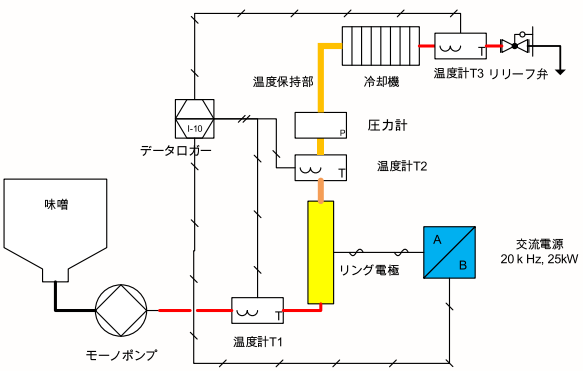


図 1　味噌の連続通電加熱装置

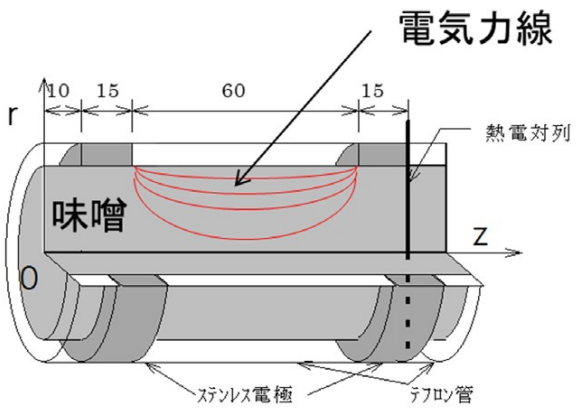


図 2　リング状電極による味噌の通電加熱機作

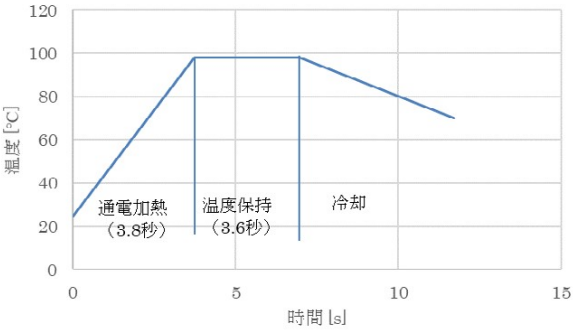


図 3　連続通電加熱における味噌の温度履歴

表 1　味噌の連続通電加熱

通電加熱条件				残存酵素活性	枯草菌芽胞の残存率
昇温時間	最高到達温度	温度保持時間	圧力		
4 s	65℃	4 s	0.5 MPa	1/14	1
4 s	95℃	4 s	0.5 MPa	ND	1/5
4 s	95℃	4 s	0.75 MPa	ND	1/500

3.　交流高電界

ジュール加熱の印加電界を高めて外部電界によって微生物の両端に生じる電位差が約 1 V に近づくと，細胞膜の両端に生じるクーロン力が細胞膜を破壊し，細胞膜に小さな穴が開く電気穿孔とよばれる現象が生じる．生じた穴が修復できないほど大きくなると，その微生物は死に至る．電気穿孔に必要な電位差である 1 V を 1 μ m の大きさの微生物と仮定すると，外部から 10 kV/cm の電界強度をもつ電界を印加することが必要になる．実際に，高電圧パルス殺菌では，数 10 kV/cm 以上の高電界のパルスを複数回繰り返し印加している．ただし，パルスは通電時間が数 μs 以下と短いことから，パルスで発生するジュール熱は小さく，非熱的な殺菌処理といえる．一方，交流高電界の場合は，食品中を大量の電流が流れるため，大きなジュール熱が発生し，食品の温度を大きく昇温させてしまうため，加熱殺菌に分類される．また，1,000 V 出力の交流電源を 1 mm の電極間隔に加え，電極間に 10 kV/cm の電界が印加されることになる．電極間で高電界を印加された食品中には，大量な電流が流れ込み，ジュール加熱による急激な温度上昇が生じるため，過度の温度にならないように狭い電極間を素早く通過させる必要がある．したがって，処理対象となる食品は粘度の低い液体食品に限られる．大腸菌添加したモデル液に電界強度の異なる交流高電界を印加したところ，5 kV/cm 以上の電界を印加したときに残存大腸菌数が大幅に減少することがわかった．ただし，電界強度が高くなるほどジュール発熱の量が多くなるため，液体の温度は電界上昇と

© 2019 Japan Society for Food Engineering

ともに上昇する．したがって，大腸菌の殺菌が電界効果によるものかジュール加熱の温度効果によるものかの区別がつかなくなる．そこで，電気伝導度の異なるモデル液を多数用意し，液体の到達温度が設定した値になるように加える電界を調整し交流高電界加熱を行った．実験結果を到達温度が一定の条件で電界強度が残存大腸菌数に与える影響をプロットした（図 4）．この結果より，材料の温度履歴が同一の場合，電界強度に比例して残存大腸菌数の対数が減少することがわかった．ただし，材料の到達温度が 65℃と 70℃で比較したところ，70℃のほうが残存大腸菌数の減少率がかなり大きくなることがわかった．つまり，交流高電界による大腸菌の殺菌は電界の効果とジュール熱による熱的な効果の相乗効果により殺菌されたといえる．

交流高電界による食品中の耐熱性芽胞の失活を考えて，電界強度を 11.5 kV/cm まで高くしてみたところ，芽胞の失活効果は増加しないことがわかった．高電圧パルスの研究では 40 kV/cm 以上の電界で漸く失活し始めた例と，失活しない例が報告されていた．つまり，耐熱性芽胞の芽胞は強固な胞子膜や外皮で覆われており，高電界による電気穿孔が生じるとは考え難い．そこで，芽胞の場合は電界効果よりも，ジュール加熱の温度による失活を目指した．具体的には，0.6 MPa 程度の加圧下で液状食品が沸騰しない状態で，交流高電界を印加し，110℃程度の温度まで材料を瞬間的に昇温した．その結果，材料に添加した芽胞が従来加熱に比べて短時間で失活することがわかった．図 5 に従来法の加熱および交流高電界の保持温度時間を変化させたときの失活速度変化のアレニウスプロットを示す．図より，従来の加熱に比べて，交流高電界後の保持温度部で，約 40 倍の失活速度になっていることが推察された [4]．図 6 に交流高電界加熱（HEF-AC）による芽胞の失活のモデルを示す．交流高電界加熱による食品中の芽胞の失活は，印加した電界により，材料中を流れる大量の電流と，それによる急激な温度上昇によって芽胞が何らかの損傷を受けたことにより，芽胞の耐熱性が低下し，その後の保持温度で急速に失活したものと考えられた．

交流高電界加熱装置の概要は図 1 の加熱ユニットを交流高電界用電極ユニットに置き換え，温度保持部分を短縮したものである．したがって，装置の大きさは非常にコンパクトになる．交流高電界用電源としては，食品材料および電極の電気分解を避けるために，20 kHz の周波数の交流で 1 kV 程度の高電圧の交流電源を用いている．小型の交流高電界加熱では，2 mm 離したチタニウム製の並行平板電極に 1,000 V の電圧を加える

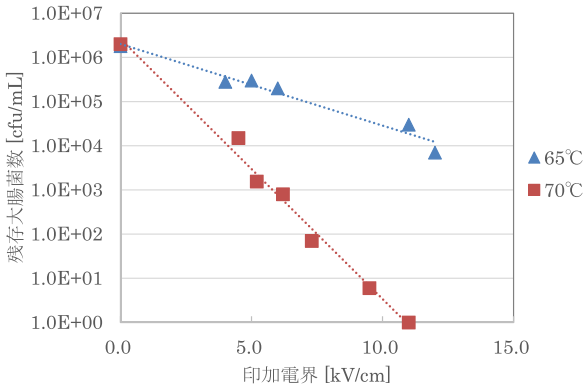


図 4　材料の温度履歴を一定にした場合，印加電界が残存大腸菌数に与える影響

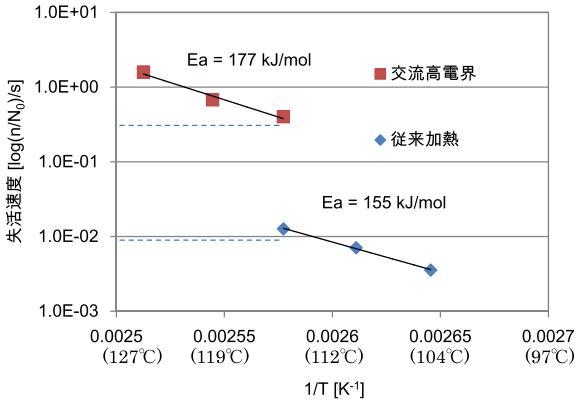


図 5　従来法の加熱処理と交流高電界の保持温度における芽胞の失活

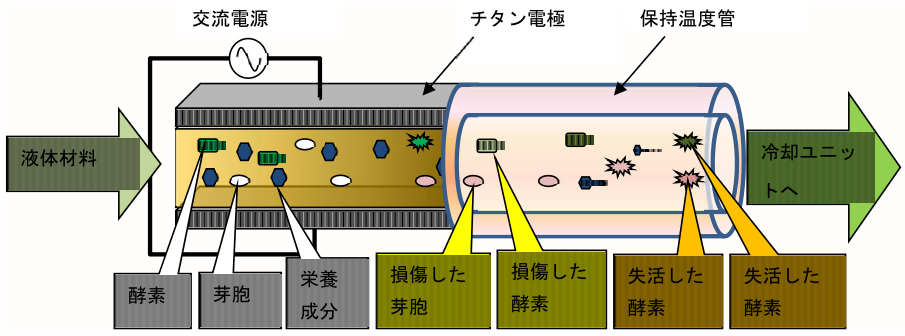


図 6　交流高電界による枯草菌芽胞失活のモデル

© 2019 Japan Society for Food Engineering

ことにより，電極間には，5,000 V/cm の高電界が生じる．電極間を約 2 m/s の速度で液体食品を流した場合，液体は 0.01 s 以内に昇温される．

交流高電界加熱の最高到達温度が各種微生物の失活に与える影響を表 2 に示す．交流高電界加熱の処理条件は，最高到達温度に達してからその温度を 1 秒間保持し，直ちに冷却したものである．表 2 の左側 2 菌種は栄養細胞であり，右側の 4 菌種は細菌芽胞である．栄養細胞の場合，印加した高電界が細胞膜に穴を開けることにより，一瞬で死に至らしめる．一方，耐熱性の芽胞の場合は，交流高電界は，高電界と交流電流による急激な温度上昇により損傷を与えたことにより，交流高電界印加後の保持温度部分における失活速度が従来加熱処理の 10 倍から 100 倍早い速度で失活したと考えた（図 5）．したがって，交流高電界後の保持温度時間を 1 s に短縮することが可能となった．つまり，交流高電界加熱により，栄養細胞から芽胞まで広範囲な微生物に対して従来の加熱処理よりも短い加熱時間でそれらを失活させることが可能となる（図 6）．

交流高電界加熱と超高温短時間加熱（UHT）の食品中の温度履歴の一例を比較すると，交流高電界は，0.01 s で目的の温度に達し，1 s の温度保持後，直ちに冷却に入るのに対し，UHT は 30 s で目的の温度に達し，30 s 温度保持後，冷却に入っている．したがって，食品が 100℃以上の高温となっている時間で比較すると，交流高電界が 5 s なのに対し，UHT はその 10 倍の 50 s 要している（図 7）．加熱時間が短いほど，熱に弱い食品材料中の香気成分や栄養成分の多くを保持することになる．例えば，搾汁直後のオレンジジュースに交流高電界加熱（HEF-AC）および同程度の殺菌効果となる UHT 処理を施し，オレンジジュース中の有用な栄養成分として，β カロテンおよびビタミン C の変化を測定した（図 8，9）．その結果，HEF-AC 処理は，UHT 処理よりも，熱に弱い栄養成分を多く残存した．また，官能検査の結果からも HEF-AC 処理の方が生に近く，高い評価結果となることが確認されている．

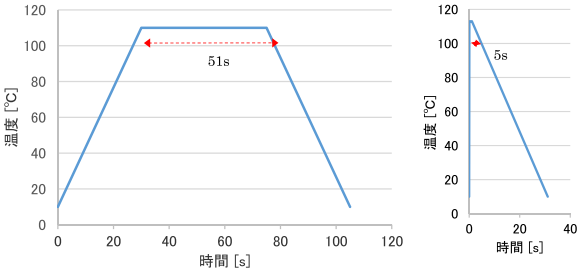


図 7　交流高電界と UHT の温度履歴

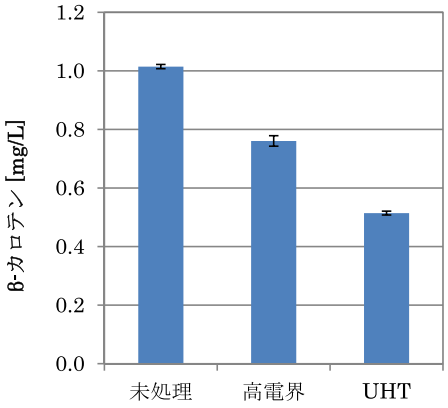


図 8　オレンジジュース中のβ－カロテンの残存量

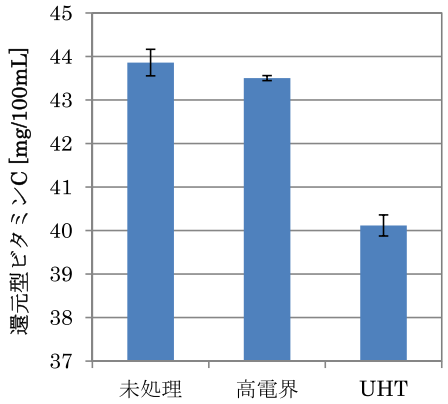


図 9　オレンジジュース中のビタミン C の残存量

表 2　交流高電界による各種微生物の失活

Tempera ture	*S.cerevi siae*	*E.coli*	*B.subtilis*	*B.cereus*	*A.acidoca ldarius*	*Geo.stearoth ermophilus*
65℃	○	△				
70℃	○	○				
110℃			×	×		
115℃			△	△	×	
120℃			○	○	○	×
130℃			○		○	×
135℃						△
140℃						○

○：99.9% 以上、△：99％以上、×：90% 以上殺菌

© 2019 Japan Society for Food Engineering

食品総合研究所（現，農研機構食品研究部門）は，飲料メーカーおよび装置メーカーと共に，平成 15 年度中小食品産業活性化技術開発支援事業で，圧力容器を必要としない技術の改良に成功し交流高電界技術を確立した．平成 15～17 年度民間結集型アグリビジネス創出技術開発事業において開発した毎時 60 リットルの液体食品を処理できる装置によって，果汁，茶飲料，コーヒー飲料の殺菌など幅広く適用できることを実証してきた [1]．また，平成 19～20 年度食品産業技術海外展開実証事業において，開発した毎時 2 トンの液状食品を殺菌できる装置によって，殺菌試験，製品の品質検査，製品の保存試験を行い，食品製造に問題がないことを確認した [2]．さらに，事業終了後から現在まで，実際の製造ラインを模して，連続運転試験，装置の耐久性試験，製品製造コストの検討を重ねてきた．平成 25 年末，これらの成果を基に，毎時 5 トン処理可能な果汁製造ライン用の殺菌装置を導入し，レモン果汁製品を上市した．本装置を導入したことにより，従来のレモン果汁製品と比べて，褐変を 1/5 に，加熱臭を 1/4 に，ビタミン C の損失を 1/10 に減少されるなど，製品の品質を向上させることが可能となった．交流高電界技術は，特別な保守や消耗品が必要無いため保守コストが削減されること，必要な電気エネルギーは UHT よりも若干低減する可能性があることなど，実用化の妨げとなる問題はおおむね解決されている．

4. 水中短波帯加熱

2017 年にポテトサラダが感染源の一つと考えられる病原性大腸菌 O157 の食中毒事故が発生した．ポテトサラダにはキュウリ等の生野菜を和える際に大腸菌等の微生物が混入すると，その後加熱処理を行わないため，その際に混入した大腸菌等が増殖する混入する可能性がある．そこで本研究では，ポテトサラダにキュウリと大腸菌を和えてパウチしたものを水中で短波帯加熱（RF 加熱）することにより，生野菜の食感を維持したまま大腸菌を殺菌することで，ポテトサラダの安全性向上を目指した．

短波帯とはこれまで述べてきた 20kHz の周波数のジュール加熱や交流高電界と，わが国では電子レンジで用いられている 2.45 GHz のマイクロ波との間の 3MHz～30MHz の周波数の交流のことである．したがって，ジュール加熱の均一加熱とマイクロ波加熱のプラスチック包材を透過する両者の特長を兼ね備えた交流であるといえる．ただし，マイクロ波ほど電磁波となり難いため，空気よりも水のような媒体の方がエネルギーを伝えやすいため，プラスチック包装した食品を水中に浸漬し，水の外から短波帯を印加した [5,6]．27 MHz の周波数の短波帯加熱（RF）は，マイクロ波の電子レンジ加熱に比べて，パウチした固体食品の低温となるコールドスポットが生じないため，食品を均一に加熱殺菌できる．

キュウリ等の生野菜を和えたポテトサラダをパウチし，図 10 に示すような水中短波帯加熱（RF）装置で加熱処理した．平行平板電極に 3 kW，27 MHz の短波帯交流を 90 秒印加すると，ポテトサラダの中心温度は温水と同じ温度の 80 ℃まで上昇した．ポテトサラダに添加した大腸菌は 6 対数（1/1,000,000）に減少し，ポテトサラダに和えた輪切りキュウリ 2 mm 厚の破断強度は，水中短波帯加熱したもの（RF）は生に近い硬度を維持することが分かった [7]．

5. 水中短波帯加圧加熱

食品の安全性，利便性を考慮した結果，個別プラスチック包装のチルド食品や常温保存可能なレトルト食品が増加している．ただし，レトルト食品は，食品の中心部を 121℃の温度で 30 分間温度保持する場合，全体として 1 時間加熱し続けるため，レトルト臭と呼ばれる加熱臭が発生したり，変色したりする問題があった．これらの問題に対処するために，加圧下で水中短波帯加熱を行う水中短波帯加圧加熱法を開発した．

図 11 に，水中短波帯加圧加熱装置の構造を示した．円筒型加圧容器内に小径の円筒電極と大径の円筒電極を配置し，円筒電極間に 60℃の加熱水を満たし，真空包装したサンマ 4 尾を放射状に水中に浸漬した．加圧容器の底からポンプで中の水を吸い出して，上から水を循環させて，容器内の水温が均一になるようにした．両円筒電極間に 27 MHz の短波帯交流を印加し，容器内の水及び真空包装したサンマを短波帯で同時に加熱した．図 12 に短波帯印加後の容器内の水の温度およびサンマ体内（中心部）の温度履歴を示した．図より，サンマの昇温速度が水の昇温速度より早いため，サンマ体内の温度は短波帯印加 5 分後に水の温度を上回り，17 分のとき水温よりも 10℃高い 130℃に到達した．また，水中短波帯加熱は，17 分間の短時間の加熱でサン

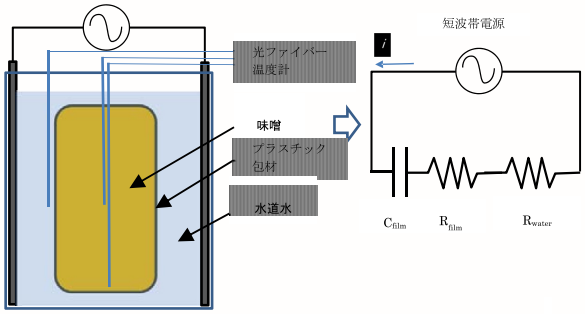


図 10　水中短波帯加熱装置

© 2019 Japan Society for Food Engineering

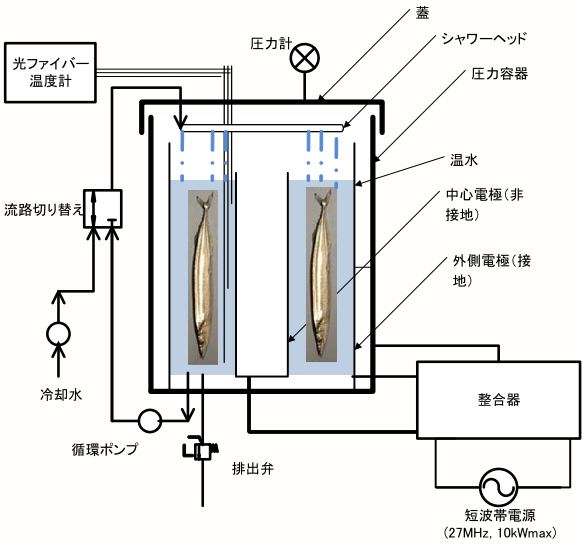


図 11　水中短波帯加圧加熱装置

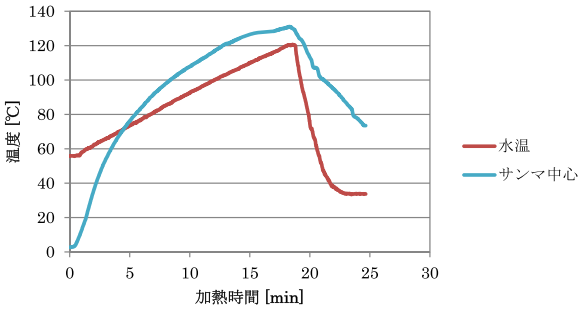


図 12　水中短波帯加熱による水温およびサンマ体内の温度履歴

マ体内に挿入した枯草菌芽胞を 5 対数以上失活し，サンマの背骨をそのまま食べられるほど軟化させた [8]．また，サンマの背骨中のコラーゲンは，水中短波帯加圧加熱を行った方が多く残存することが分かった [9]．

6. ま と め

以上，交流電界を利用したミニマムヒーティングプロセスとして，味噌の連続通電加熱，果汁の交流高電界殺菌，ポテトサラダの水中短波帯加熱，および魚の水中短波帯加圧加熱の応用例について述べてきた．交流高電界技術は，殺菌だけでなく食品に含まれる酵素を失活することも利用されている [10]．その他，短波帯連続加熱を利用した液卵や豆乳等たんぱく質を含む液体食品の殺菌への応用 [11,12] が進められている．また，パルス電界を利用した乳酸菌の機能性発現 [13,14] などの研究を実施しており，電気を利用したミニマムヒーティングプロセスは殺菌だけでなく，食品の高付加価値化にも寄与する技術として広がりを見せている．

引 用 文 献

1) 植村邦彦，小林功，井上孝司，中嶋光敏，交流高電界処理における電極内部の温度分布の解析，食品総合研究所研究報告，**71**, 27–32, 2007.
2) 植村邦彦，高橋千栄子，小林功，連続通電加熱による味噌の殺菌，日本食品科学工学会誌，**63**, **11**, 516–519 (2016).
3) 植村邦彦，高橋千栄子，小林功，連続通電加熱による味噌中のフォスファターゼ失活，日本食品科学工学会誌，**63**, **12**, 575–577 (2016).
4) K. Uemura, I. Kobayashi, T. Inoue: Food Science Technology Research, **15**, **3**, 211 (2009).
5) 植村邦彦，高橋千栄子，小林功，短波帯加熱処理による包装済み味噌の酵素の失活，日本食品科学工学会誌，**61**, **2**, 95–99 (2014).
6) 植村邦彦, 高橋千栄子, 小林功, 包装済み豆腐の短波帯殺菌，日本食品科学工学会誌，**62**, **11**, 541–546 (2015).
7) 植村邦彦，水中短波帯加熱によるポテトサラダの殺菌，農研機構研究報告食品研究部門，**2**, 15–19 (2018).
8) K. Uemura, S. Kanafusa, C. Takahashi and I. Kobayashi, Development of a radio frequency heating system for sterilization of vacuumpacked fish in water Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, **81**, **4**, 762–767 (2017).
9) Sumiyo Kanafusa, Chieko Takahashi & Kunihiko Uemura, The effect of radio-frequency heating on vacuum-packed saury (Cololabis saira) in water, Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, **82**, **9**, 1576–1583 (2018).
10) 植村邦彦，高橋千栄子，小林功：日本食品科学工学会誌，**63**, **12**, 575–577 (2016).
11) Uemura, K., Kobayashi, I.: Journal of Food Engineering, **100**, **4**, 622–626 (2010).
12) Uemura, K., Takahashi, C., Kobayashi, I.: Food Science and Technology Research, **18**, **3**, 357–362 (2012).
13) Tetsuro Ohba, Kunihiko Uemura, Hiroshi Nabetani, Moderate pulsed electric field treatment enhances exopolysaccharide production by Lactococcus lactis subspecies cremoris, Process Biochemistry, **51**, **9**, 1120–1128 (2016).
14) Tetsuro Ohba, Kunihiko Uemura & Hiroshi Nabetani, Changes in biosynthesis of exopolysaccharide in Lactococcus lactis subspecies cremoris treated by moderate pulsed electric field treatment, Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, **81**, **4**, 724–734 (2017).

「化学工学会誌　Vol. 82 pp. 370–373 を改訂して転載」

© 2019 Japan Society for Food Engineering