

高周波誘電加熱による食品原料の解凍

山本 泰司 (やまもと やすじ) 山本ビニター(株) 代表取締役

1. はじめに

飽食の時代などと言われて久しい。スーパーやデパート、ファーストフード、外食産業やコンビニなど我々の周りには様々な種類や形態の食品が溢れ、好きなものを何時でも好きな量だけ手に入れることができる。これらの多くは、食品メーカーの工場で大量に生産される加工食品であり、使われる食品原料、例えば鶏・豚・牛などの畜肉や魚肉は、冷凍状態の貯蔵・流通が主流である。冷凍されることで品質の経時変化と細菌の繁殖を抑えることができるため、長期保存ができる。食品の冷凍技術の進歩が、食品工場の大量かつ計画的な生産をもたらしたとも言える。加工食品が我々の口に入る時点の品質は、食品原料そのものの鮮度や品質、加工技術や品質管理に依存していることは言うまでもないが、加えて食品原料の冷凍方法や解凍方法にも大きく依存している。近年、食品の冷凍技術や冷凍装置は飛躍的に進歩し、生産性が高く低コストでしかも高品質が確保されている。一方、冷凍技術と表裏の関係にある解凍技術は、依然として空気解凍(送風、冷蔵庫)や水解凍(流水、ミスト)が主流であり、生産性が低い上に品質の劣化が大きい。現状、解凍技術や解凍装置の進歩が強く求められている。

解凍は、単純に食品の品温を高め、水を溶かすという操作であり、品質を保持するためには、品温が一定温度以上に高くない範囲でいかに迅速に水を溶かすかということが求められる。空気解凍や水解凍は、外部からの熱伝導による加熱であり、いわゆる緩慢解凍で時間がかかる。解凍速度を上げようとするれば、食品の表面と内部との温度差が大きくなり、ドリップの発生などによる品質劣化が大きく、また細菌汚染の危険性もある。これに対し高周波やマイクロ波による誘電加熱を解凍に利用した場合、食品そのものが発熱する内部加熱となる。食品の表面と内部の温度差を少なく短時間に品温を高めることができるため、急速解凍が可能で品質の劣化が少ない解凍法と言える。

本稿では、高周波誘電加熱を利用した食品原料の解凍、特に最近加工食品の生産工場での普及が進む高周波解凍装置について紹介する。

2. 冷凍と解凍

ある同一食品の冷凍と解凍を考えた場合、食品に含まれる水分のうち一定量を冷凍するために取り除いたエネルギーの絶対量と、その氷を再びもとの水に戻すために加えるべきエネルギーの絶対量は一致するはずである。しかしながらこの2つには大きな違いがある。(図1)は、同一食品の冷凍曲線と解凍曲線を示したものである。冷却開始10分後の冷却速度と解凍開始直後の昇温速度はほぼ一致しているが、最終目的温度まで到達するまでの解凍時間は、冷凍の2倍以上かかる。このような違いの原因は、食品内部におこる熱伝導率や比熱の変化の影響が大きい。水の熱伝導率は、水の約4倍ある。冷凍過程は、液体状態の水が固体へと変化する過程であり、冷凍と同時に熱はきわめて移動し易くなる。これに対し解凍過程は熱が移動しにくくなるので、外部からの熱伝導では食品の表面に熱が蓄積することになり、食品表面の温度のみが上昇

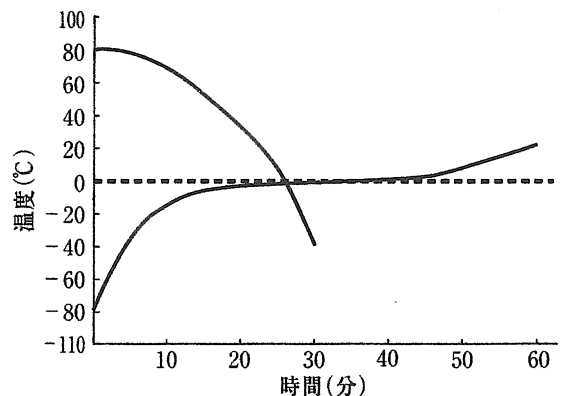


図1 冷凍曲線と解凍曲線

し易い。これは解凍時間を遅らせるだけでなく、品質の劣化を招く。表面の蓄熱を少なくするためには、外部の温度を上げずに食品内部の温度を平均的に高くしていくことが必要であるが、外部加熱では困難である。高周波誘電加熱やマイクロ波加熱による内部加熱は、食品の内部と外部を温度差少なく急速に加熱することができるので、うまく利用することにより理想的な解凍ができる。

3. 高周波誘電加熱とマイクロ波加熱

誘電加熱は、被加熱物自体が自己発熱するため一般的な外部加熱との対比で内部加熱と言われている。しかし実際高周波やマイクロ波は、(図2)のように被加熱物の表面から入り、徐々に熱エネルギーに変換され減衰されながら内部に浸透していく。このとき熱に変換される電力(P)は、周波数(f)、電界の強さ(v/m)、損失係数($\epsilon_r \cdot \tan\delta$)に比例する。周波数が高ければ高いほど、また電界(出力)が強ければ強いほど、発熱が大きい。損失係数は、それぞれの物質が持っている固有の電気的特性であるが、一般に食品は高く誘電加熱され易い。しかし周波数や温度によって変化するので注意が必要である。例えば(表1)に示すように水と氷の損失係数は、大きく異なる。解凍とは氷が水に転換する過程であり、解凍が進むほど発熱され易くなるが、特に周波数が高いと顕著である。冷凍食品の表面の一部が早く解け、氷から水に転換することにより、この部分がより強く発熱する熱暴走(ランナウェイ現象)を起こす。これは高周波よりマイクロ波の方が起し易い。均一な解凍を求めるには、高周波の方が適している。

高周波やマイクロ波の電力密度が、物質表面の1/2に減衰する深さを電力半減深度(D)と呼ぶが、電力半減深度は周波数(f)と損失係数($\epsilon_r \cdot \tan\delta$)に反比例する。つまり周波数が高いほど、また発熱され易い損失係数が高い物質ほど、エネルギーは深く浸透せず表層部で熱に変換される。(表2)は、高周波とマイクロ波を比較したものであるが、冷凍牛肉の場合、高周波の方がマイクロ波より約5倍深くまで加熱することができる。解凍が進み、温度が上昇すると損失係数は上昇する傾向にあるため、マイクロ波の場合さらに半減深度が小さくなり、加熱を続けることで表層部と内部との温度差が大きくなる。厚みのある容量の大きな食品を解凍するには、高周波の方が適している。

このように同じ誘電加熱でも高周波の方がマイクロ波より食品解凍には適しており、より品質の高い解凍

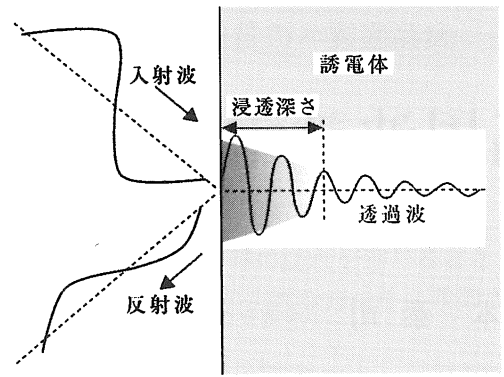


図2 誘電体に投射された電磁波

表1 水と氷の損失係数

	高周波(13.56MHz)	マイクロ波(915MHz)
氷(-15℃)	0.07	0.06
水(15℃)	0.63	2.7
損失係数の差	約9倍	約45倍

表2 牛肉の電力半減深度

	高周波(13.56MHz)	マイクロ波(915MHz)	電力半減深度の差
冷凍牛肉(-15℃)	61cm	12cm	約5倍
生牛肉(15℃)	26cm	3cm	約8.6倍

が行えることがわかる。特に食品工場で使われる冷凍食品原料は、ダンボール箱に入れられ、厚みがあり容量が大きいので、高周波の方が有利である。わが国では、ISMバンドの13.56MHz或いは、27.12MHzの周波数を用いた高周波解凍装置が主流となっている。欧米では、高周波に加え915MHzのマイクロ波を利用した解凍装置が実用化されている。家庭用の電子レンジで広く使われる2,450MHzのマイクロ波の利用は少ない。

4. 高周波誘電加熱によるテンパリング

(図3)は、高周波誘電加熱での冷凍食品の温度上昇曲線を示したものである。0℃に近づくにつれて温度上昇がにぶり、そのまま加熱を続けても完全解凍は困難である。通常解凍が進むと食品内部の自由水が溶け始め、融解潜熱にエネルギーが奪われるので温度上昇がにぶる。しかし高周波の場合は、それだけではない。高周波で誘電加熱する場合、冷凍食品は空気層(エ

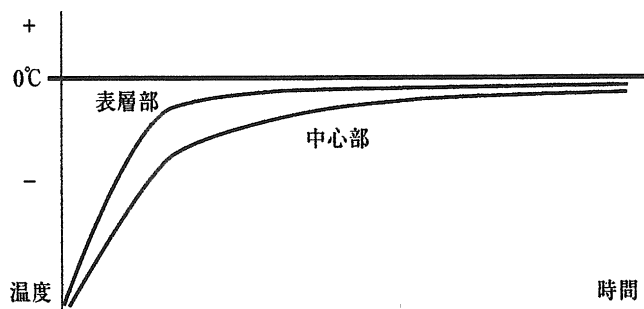


図 3 高周波解凍による温度上昇曲線

アーギャップ)を挟んで加熱される。このとき水は効率よく加熱されるが、水は空気との誘電率(ϵ_r)の差が大きすぎるため、高周波電圧が加わらず加熱されにくい。つまり冷凍食品の解凍が進み、表層部が氷から水に転換されるにつれて、加熱効率が極端に低下し、徐々に加熱されなくなる。この特性は、高周波解凍における熱暴走を防ぐのに好都合である。これに対しマイクロ波は、電子レンジからも分かるように水を効率よく加熱することができる。解凍が進むにつれホットスポットの出現や部分的なオーバーヒートへの注意が必要である。

一般に畜肉などの食品原料は、 -20°C 程度でダンボール箱などに入れられ冷凍保存されている。これらの畜肉は、次工程のための加工しやすい大きさに分割されるが、そのままの状態では非常に硬く氷結しており、加工が困難である。しかし $-5\sim-1^{\circ}\text{C}$ 程度の半解凍状態にすれば加工が容易であり、品質の低下も防止できる。この氷点より少し低い温度帯で、部分的にまだ氷の残る半解凍状態にすることを、完全解凍と区別してテンパリング(tempering)と呼んでいる。このテンパリングに高周波誘電加熱を利用すれば、短時間でしかも均一に高品質に解凍できるので、非常に都合がよい。これを高周波テンパリングと呼び、現在様々な冷凍食品に広く利用されている。

このテンパリングの温度は、食品の種類や解凍後の加工方法などにより異なる。例えば、牛肉のスライス加工には $-5^{\circ}\text{C}\sim-3^{\circ}\text{C}$ が、ハンバーグ製造用の牛・豚肉のミキサー加工には $-3^{\circ}\text{C}\sim-1^{\circ}\text{C}$ が、鶏から揚げ加工用には $-1^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ の温度帯が適している。高周波テンパリングでは、仕上げ温度の調整を高周波出力と解凍時間の調整により簡単に確実に行えるので、高い品質管理が可能である。

ちなみに完全解凍が求められる食品原料も多いが、この場合はテンパリング後に引き続き解凍を進める必要がある。高周波やマイクロ波の利用は、効率が悪い上に品質の劣化を招き易いので、避けるべきである。

そこで最近、高周波誘電加熱と空気解凍などの外部加熱による解凍を組み合わせた複合型の解凍の実用化が進みつつある。例えば、高周波テンパリングの後に、ミスト送風式解凍や冷蔵庫式解凍を行なう組み合わせである。氷点以下の解凍は、高周波誘電加熱で品質を確保しつつ短時間に、そして氷点以上の完全解凍には、時間がかかるが品質劣化の恐れのない空気解凍などを利用して、トータルとして品質、生産性、コストなどを追求していこうとするものである。

5. 高周波テンパリングと高周波解凍装置の特徴

他の解凍方法と比べ、高周波テンパリングは次のような特徴がある。

- (1) 氷点以下の温度までの解凍である。
- (2) 5分~60分の短時間で処理できる。
- (3) 表面と内部の温度差が少ない。均一で品質が高い。
- (4) ドリップロスが少ない。歩留まりが高い。

実際の食品工場で使用されている高周波解凍装置の特徴は、次のように整理できる。

- (1) 生産量に合わせて、必要な量を即時解凍できる。
- (2) 連続処理できる。生産設備のライン化が可能である。
- (3) 厚みのある容量の大きなものの解凍が可能である。
- (4) 包装したままやダンボール箱のまま解凍できる。
- (5) 他の解凍法との組み合わせで完全解凍が可能である。
- (6) 省スペースである。
- (7) 水は一切使用しないので、排水処理の問題がない。
- (8) 作業環境が良い。HACCP対応し易い。

6. 高周波解凍装置

現在、高周波解凍装置は、少量生産用のバッチ式小型装置と、大量生産用の連続式大型装置の2種類が実用化されている。弊社の開発した高周波解凍装置(テンパトロンFRT型シリーズ)をここで紹介する。

6.1 バッチ式小型解凍装置

(表3)と(図4)は、主仕様と概観写真である。食品の種類や仕上げ温度によって異なるが、時間当たりの生産量100kg~150kgのバッチ処理ができる。高周波発振機は、装置の下部に、制御装置はオープン上部に内蔵されている。上下一対の高周波電極は、オープン内にある。下電極はスライドテーブルの下に内蔵されている。上電極は、食品原料の高さに合わせ自動的に昇降する。作業者は、まずスライドテーブルを引

表 3 バッチ式高周波解凍装置の主な仕様

商 品 名		テンパトロン (TEMPERTRON)	
型 式	FRT-5	FRT-8	
高周波周波数	27.12MHz		
高周波出力	5KW	8KW	
解 凍 時 間	5分～60分 (製品、仕上温度によって異なる)		
処 理 能 力	仕上り - 5℃	100kg/h	150kg/h
	仕上り -2.5℃	75kg/h	110kg/h
	仕上り - 1℃	60kg/h	90kg/h
テーブルサイズ	W750 x D500mm	W1100 x D500mm	
機 械 大 き さ	W1100 x D900 x H1850mm	W1450 x D900 x H1850mm	

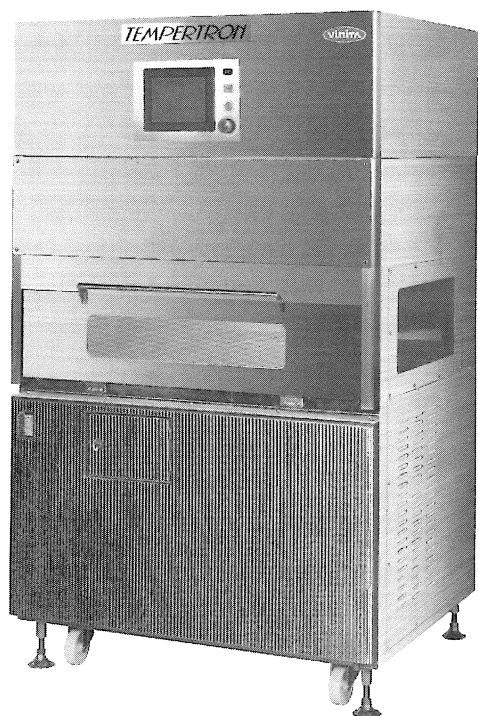


図 4 バッチ式小型高周波解凍装置

き出し、この上に食品原料を置く。手でテーブルをオープン内に入れ、オープン扉を閉じる。その後、制御パネルに解凍時間などを入力し、スタートボタンを押すことで解凍作業が開始される。解凍の終了は、タイマーにより自動的に高周波停止され、ランプやブザーで作業者に合図される。またそれぞれの食品ごとの解凍条件は、制御パネルに記憶させることが可能であるため、初回以降は食品種類の呼び出しとスタートボタンだけの簡単な作業でよい。これらの小型解凍装置は、多品種小ロットの解凍に適しているため、現在コンビニの惣菜や弁当の製造工場、外食チェーンのセントラルキッチンなどで使われ始め、普及が進んでい

表 4 連続式高周波解凍装置の主な仕様

商 品 名		テンパトロン (TEMPERTRON)	
型 式	FRT-30	FRT-120	
高周波周波数	13.56MHz		
高周波出力	30KW	120KW	
解 凍 時 間	5分～60分 (製品、仕上温度によって異なる)		
処 理 能 力	仕上り - 5℃	1 ton/h	4 ton/h
	仕上り -2.5℃	750kg/h	3 ton/h
	仕上り - 1℃	500kg/h	2 ton/h
コンベア幅	1000mm	1650mm	
機 械 大 き さ	W2240 x L5800 x H2870mm	W2550 x L10000 x H3550mm	

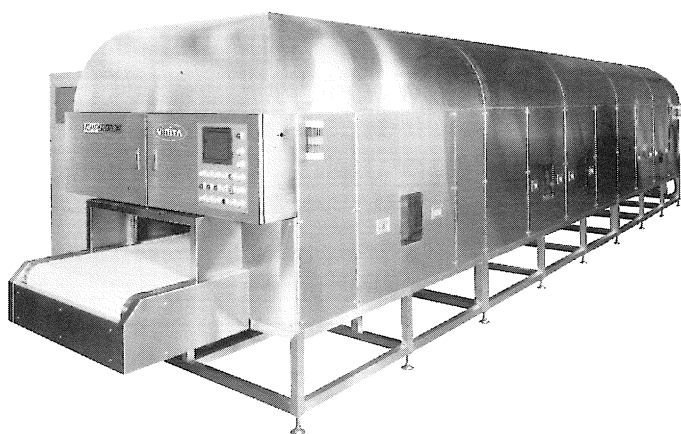


図 5 連続式大型高周波解凍装置

る。

6.2 連続式大型解凍装置

(表 4) と (図 5) は、主仕様と概観写真である。時間当たり 1 ton～4 ton の大量処理が連続的に可能である。食品原料は、搬送ベルトで入り口から出口に運ばれる間にオープン内で高周波加熱され、解凍が進められる。この搬送ベルトに沿って、高周波発振機と電極が複数台 (通常は 2 組から 3 組) 設置されている。食品原料の解凍の進行状況 (温度) に合わせ、複数の高周波発振機を制御することで、常に最適な状態で高周波加熱できるように工夫されている。一連の解凍作業は、次の通りである。投入する食品原料の量、高さ、高周波出力、解凍時間などの解凍条件をあらかじめ制御パネルに入力する。スタートボタンを押すと、解凍時間に合わされたスピードで搬送ベルトが動き出すので、その上に一定量の食品原料を整列して投入する。食品がオープン内に投入されると電極高さやそれぞれの高周波発振機の出力などの条件が自動的に設定され自動制御される。オープン出口から時間当たり一定量

の解凍された食品が排出される。大規模食品工場における大量生産に適した装置である。高周波解凍装置の前後に、自動整列投入装置と自動排出装置をつけ、ラインとして完全な自動化を実現している工場が多い。

7. 食品工場における実例の紹介

7.1 コンビニ弁当用の冷凍原料の解凍

コンビニ弁当を製造している食品工場では、1日3回の配送を行っており、短納期、多品種、少量の厳しい生産に対応している。ほとんどの食材は冷凍品である。剥き海老、鶏・豚・牛のバラ肉や角切りなどの食品原料は、製造現場で解凍後に調理される。ハンバーグ、オムレツなど調理後密封パックされた冷凍品も多い。これらは解凍した後に開封し、弁当に直接盛りつけている。特に製造現場で解凍が問題となっているのは、食品原料よりこれらの調理済み食品の方である。

この分野で活躍している小型の高周波解凍装置の実例について紹介する。盛り付ける際の調理済み食品の温度は、衛生上10℃以下とされ、厳格に管理されている。逆にマイナスの温度帯であっても、盛り付け後に店舗へチルド配送されるまでの2~6時間の間に、完全解凍されるのであれば問題ない。一般的に解凍は、冷蔵庫解凍や水・氷解凍であり、一部ミスト式送風解凍も行われている。主流は冷蔵庫解凍であるが、解凍に8時間から12時間程度かかる。このため生産予測に合わせ解凍作業を行っているが、急な生産量の増加には対応できない。一方、水・氷解凍やミスト送風解凍の場合、10分から数時間程度の短時間解凍が可能であるが、品温の管理が難しいという問題がある。特に大きな問題となるのは、密封されたパックにピンホールがあった場合であり、水・氷解凍やミスト解凍では菌汚染の可能性があり、十分な注意と管理が必要になってくる。

これに対し高周波解凍装置は、5分から20分という急速なテンパリングが可能で、多品種の短時間処理には最適である。密封パックの状態、水やミストなどを使わず衛生的に解凍できることが大きなメリットで、高周波解凍装置の普及導入が進んでいる一番の理由であろう。食材により異なるが、テンパリング温度は食品内部が-2℃~0℃程度、表面が0℃~+5℃程度である。処理後に手で触った感触は柔らかく、それぞれの食材が簡単に身割れできる状態である。直ぐに開封して、そのまま盛り付けることができる。この状態で環境温度10℃程度に1時間から3時間程度放置されると、食品内部も0℃以上となり完全解凍状態となる。(図6)に一例としてハンバーグ(1,200g/パック)

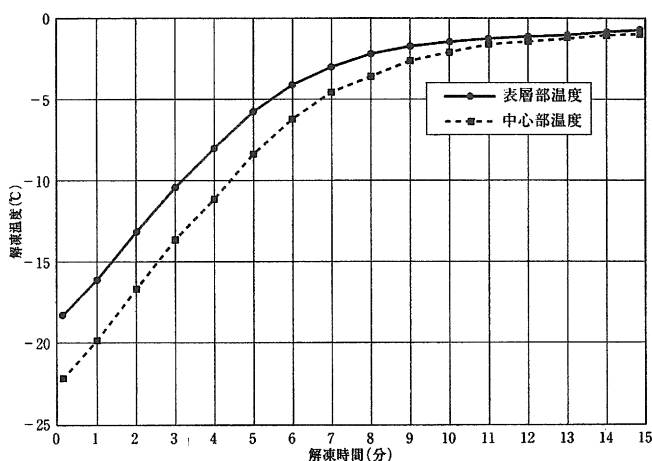


図6 ハンバーグの温度上昇曲線

ク)の高周波テンパリングによる温度上昇曲線を示す。この成功例のキーワードは、「スピード」と「安全」である。

7.2 骨付き鶏肉の解凍

ヘルシー嗜好の高まりと共に鶏肉の消費量が大きく伸びている。我が国で加工食品に使用される鶏肉の多くは、海外からの輸入冷凍品である。通常はタイ、中国などの海外原料工場です骨処理され、胸肉や腿肉の種類ごとに大きさを揃えてカットされ、パックに密封されている。パックの大きさは、205×290×高さ50mm(2kg/パック)の比較的小型のものが主流である。また表面がフラットで大きさが整っているため、非常に誘電加熱され易い。短時間に0℃近くの温度帯まで比較的均一に解凍できることより、古くから高周波やマイクロ波のテンパリングが利用されている。大規模食品工場の鶏から揚げのラインでは、初期温度-20℃程度の鶏肉を1時間当たり1t~3t連続的に処理

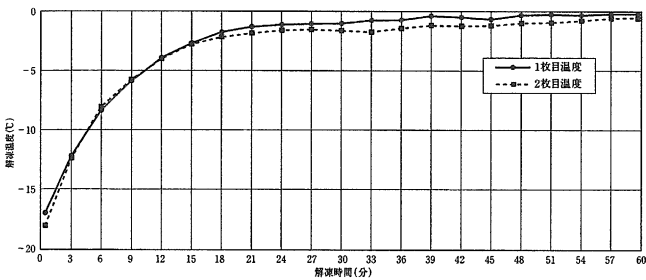


図 7 骨付き鶏肉の温度上昇曲線

する大型の高周波連続解凍装置使われている。解凍時間は10分～15分程度で、 $-2^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ までテンパリングした後、味付け工程へ自動的に連続搬送され、高い生産性を実現している。

鶏肉が誘電加熱され易いのは、パックの形状や大きさだけでなく、肉質が均一で、脱骨されていることの影響が大きい。骨付き肉の均一な解凍は難しい。骨部と肉部とでは、誘電損失や導電率が大きく異なるため、加熱分布が不均一となる。また骨部が飛び出したり、突起があったりすると、そこに高周波やマイクロ波が集中するので、過加熱となり易い。特にマイクロ波の場合この傾向が強く、 $-5\sim -8^{\circ}\text{C}$ 程度までのテンパリングに止めておかないと、部分煮えが強く発生する。これに対し高周波加熱では、高周波加熱条件を整え比較的ゆっくりと加熱してやることで、 $-2^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ までのテンパリングが可能である。

この分野で実績のある高周波連続式解凍装置について紹介する。本装置では、骨付き鶏肉は $305\times 435\times$ 高さ200mmのダンボール箱に、3パック(2kg/パック)が重ねられ入っており、ダンボール箱ごと連続的に処理する。(図7)に骨付き鶏肉の温度上昇曲線を示す。解凍時間は60分以上を要する。仕上がり温度は

$-2^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ とまだマイナスの温度帯が多いが、柔らかく手で十分ほぐれる状態になっている。上中下3枚のパックの仕上がり温度差は、 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 程度であり、部分煮えもなく非常に高品質な仕上がりである。従来は冷蔵庫解凍と共に一部水解凍が使われていた。水解凍品で揚げ調理した場合、厚みのある部位の火の通りが悪い、また製品のエッジ部の色が濃いなどのクレームが起り易い。明らかに高周波解凍品の方が、最終製品の品質が向上すると評価されている。また、水解凍を廃止することで作業環境がドライフロアーに一新され、また排水処理に対する環境対策が不要となったメリットも大きい。この成功例のキーワードは、「美味しさ」と「環境」である。

8. おわりに

食品産業全体の変化にともない、食品工業自体も大きく変化し、加工方法や加工装置も変革が求められている。「多品種少量」、「短納期」のキーワードに加え、「安全」、「美味しさ」、「環境」の新しいキーワード求められる時代である。

誘電加熱による冷凍食品の解凍は、20年以上の歴史がある。しかしながら解凍装置の導入実績は、まだまだ少なく本格的な普及に至っていない。これは解凍が自然に放置しておいても可能であるという考え方が一般的であり、解凍に多額の設備投資ができなかったためであろう。しかしながら「多品種少量」、「短納期」、「安全」、「美味しさ」、「環境」らのキーワードは、これらをブレイクスルーする力を秘めている。誘電加熱による解凍、高周波テンパリング、高周波解凍装置が、今後広く急速に普及することが期待される。

参考文献

- 1) 柴田長吉朗：工業用マイクロ波応用技術、電気書院(1986)
- 2) 金井秀夫・栗山一政：マイクロ波加熱と誘電加熱、電熱 No. 45 (1986)
- 3) 金井秀夫：高周波解凍・新しい食品加工と装置、産業調査会(1991)
- 4) 高井陸雄：食品の解凍、食品機械装置 9 (1991)
- 5) 山本泰司：高周波誘電加熱によるテンパリング装置の開発と概要：ニューフードインダストリー Vol. 37 No. 4 35-40 (1995)
- 6) 山本泰司：高周波解凍装置と実例：ニューフードインダストリー Vol. 43 No. 3 8-16 (2001)