

環境試料前処理に関する研究

—— マイクロ波を使用した前処理 ——

清野 浩, 大石 幹雄, 鈴木 正吾, 美山悌二郎*
井関 市雄**, 菅原 和也***

東北大学医療技術短期大学部 診療放射線技術学科

*東北放射線科学センター

**東北計器工業株式会社

***菅原内科医院

A Study on Pretreatment of Environmental Samples —— Using Microwave Heating Methods ——

Hiroshi SEINO, Mikio OISHI, Shogo SUZUKI, Teijiro MIYAMA*
Ichio ISEKI** and Kazuya SUGAWARA***

Department of Radiological Technology, College of Medical Sciences, Tohoku University

**Tohoku Radiation Science Center*

***Tohoku Instrument Company*

****Sugawara Clinic*

Key words: 環境放射能, 食品試料, 試料前処理, マイクロ波加熱

In order to measure the radio-activity of environmental samples around nuclear power plants, we need a large amount of them because of their low activity levels, and it takes much time, several days or more, to treat them for measurement.

We studied microwave heating methods for the purpose of shortening the pretreatment time of environmental samples such as vegetables and fishes. Dehydration is possible by the direct radiation of microwave. For carbonization and ashing, we made a heating container of porcelain beakers and barium titanate (BaTiO_3), which is a ferroelectric material. The container is heated up to 450°C by the microwave absorption of BaTiO_3 , so the samples in the container are heated and reduced to ashes.

We use a microcomputer to operate the apparatus, and the temperature is also controlled by the programs, which are prepared for each step: dehydration, carbonization and ashing.

The experimental results show the possibility of shortening the pretreatment time in comparison with the time needed in the conventional method using hot-air drying and electric furnace.

I. 緒 言

原子力発電所の環境モニタリングは、水(雨水、河川水、海水)および生物(動物、植物)など多くの種類について行っているが^{1)~3)}、殆どが自然放射能であるのでこれらの放射能レベルは極めて低く、試料を測定に供し得るようにするには、かなりの量を処理しなければならず、その前処理に非常に多くの時間と労力を要している。現在一般に用いられている温風乾燥後、電気炉で灰化する方法⁴⁾⁵⁾は、測定までに数日あるいはそれ以上を要しているため、その解析、評価を遅らせることになる。

本研究はこれらの試料のうち、食品の一部の前処理をマイクロ波を用いてより迅速に行うことを目的とするものである。マイクロ波を用いた動植物の脱水、乾燥についてはすでに研究⁶⁾⁷⁾もされているが、本研究では環境試料の脱水の検討から始め、炭化、灰化を行う方法の検討、実験を行い、市販の電子レンジを用いて灰化装置を試作し灰化の方法を検討した。

マイクロ波は水など誘電率の大きい物質には吸収され、内部から加熱されるので、葉菜類、魚介類などのように水分を多く含む物質の脱水は容易である。しかし脱水後の乾燥試料はマイクロ波を吸収しないので、直接加熱は出来ないため、強誘電体であるチタン酸バリウム⁸⁾を容器の内部に入れた加熱容器で脱水試料を炭化、灰化する間接加熱法を採択し、加熱装置を試作して温度制御装置をつけて灰化実験を行い、この方法が実用に供し得るものであることを確かめた。

II. マイクロ波による加熱の原理および方法

1. マイクロ波加熱の原理

誘電体物質に高周波電界を加えると、物質中で雑然となっていた電荷が電界の極性によって整然とした双極子になり、高周波電界の極性の変化によって双極子即ち分子は振動、回転をして互いに摩擦し、熱を発生する。

この時誘電体中で熱に変わる電力損失は次式で表される。

$$P = (1/1.8)f \cdot V^2 \cdot \epsilon \cdot \tan \delta \times 10^{-12} \quad (\text{W/cm}^3)$$

但し P: 電力損失
V: 高周波電界
f: マイクロ波周波数
 ϵ : 物質の誘電率
 $\tan \delta$: 物質の誘電体損失角

ここで周波数はISM周波数帯で、加熱用としては我国では殆ど2,450 MHzである。

2. マイクロ波による脱水、炭化及び灰化の方法

(1) 脱 水

水は誘電率が大きく、マイクロ波を吸収するため容易に加熱され、水分を蒸発させることができる。水分を多く含んだ葉菜類、魚介類などは直接加熱脱水が可能である。

脱水するときは蒸発し易いように試料を次のように細かく裁断した。

きゃべつ: 幅1 cm, 長さ1.5~2 cmに切断

きゅうり: 1辺が1 cm程度に角切

松葉, 米: そのまま

ほや, あいなめ, あわび: 可食部のみを冷凍し、数 mm 角の細片にした

(2) 炭化と灰化

脱水された試料はもはや殆どマイクロ波を吸収しないので、照射による直接加熱は不可能である。したがって容器をマイクロ波で照射し加熱する方法を採った。容器の材料として金属は用いられないので、ガラスか陶磁器になるが、これらは誘電率が大きくないので容器の壁に誘電率の大きい物質を埋め込んでマイクロ波を吸収させて容器を加熱する。誘電率の大きい物質としては、水晶、ロッシェル塩、チタン酸バリウムなどがあるが、高温になることを考慮して強誘電体のチタン酸バリウムを選んだ。

III. 灰化装置の試作

1. 概 要

装置の概要を図1にブロック図で示す。脱水、炭化、灰化の各段階とも試料あるいは試料容器の温

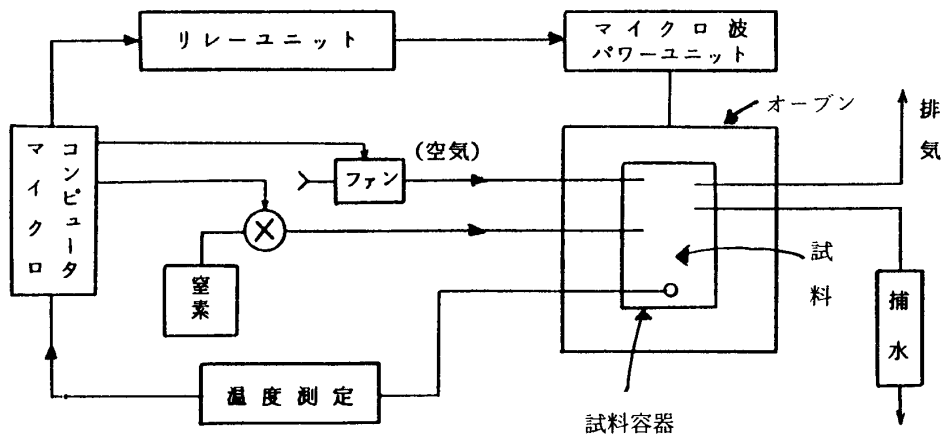


図1. 灰化装置のブロック図

度を検知することにより、マイクロコンピュータでマイクロ波パワーユニットの動作を制御し、各段階に必要な温度を保持すると同時に、窒素や空気などの雰囲気も制御する。容器は脱水用には磁器ビーカーを用い、炭化と灰化にはチタン酸バリウムを側壁に入れた磁器ビーカーを用いた。

2. マイクロ波パワーユニット

マイクロ波発生源としては市販の電子レンジを使用した。試料の基礎的実験には500 W レンジを用い、実規模的实验には1,400 W レンジを用いた。表1にこれらの規格の概要を示す。

マイクロ波パワーユニットについては、出力可変のユニットも考えたが、基礎実験を重ねるうちに温度制御はマイクロ波パワーのON-OFFで十分であることが確認出来たので、1,400 W レンジをそのまま用いた。

3. 温度測定

温度測定にはアルメロクロメル熱電対を用いた。これは直径が1 mm で細いため、このままで

表1. 電子レンジ規格

	500 W	1,400 W
電 源	AC 100 W	AC 200 W
消 費 電 力	950 W	1,400/2,700 W
マイクロ波出力	500 W	700/1,400 W 2 段切換
発 振 周 波 数	2,450 MHz	2,450 MHz
加 熱 室 寸 法	300×305×189 mm	365×405×245 mm

はマイクロ波で放電が起こり、溶断することがあることと、電界のため温度指示が大きくばらつくため、0.6 mm の厚さで直径が4.0 mm と9.5 mm のステンレスのパイプで二重にシールドした。測定器は神港電機計器 AD-4522 型デジタルサーモメータを使用した。

4. 雰囲気制御

脱水が始まり試料が乾燥状態になった時と脱水された試料を炭化するときには、マイクロ波で放電が起こり点火し燃焼することがあるが、点火を防止するため窒素ガスを流せばよいことが確かめられたので、脱水時と炭化が始まる前の150℃ から電磁弁を開いて窒素ガスを流すようにした。

灰化時には空気が少なくなると、酸素不足で灰化が遅くなるので、150℃ で空気を送るようにした。流量は窒素、空気とも100~150 cc/min 程度で十分である。

5. 容 器

(1) 脱水用

基礎実験のための容器は普通のビーカーを使用した。実規模用としては1.5 l の磁器製ビーカー(図2)を用いた。側面の孔は窒素ガス送風用(上部)と熱電対用(下部)である。上蓋には同じ磁器製ビーカーの2 l 用の底部を利用し、それに排気孔をあけた。

(2) 炭化・脱水用

先に述べたように炭化・灰化用容器は、容器自体を加熱昇温するために容器の壁内にチタン酸バ

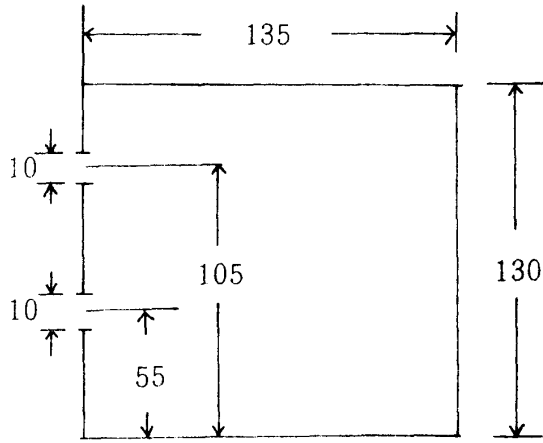


図2. 脱水用容器 (単位 mm)

リウムを入れることを考えた。チタン酸バリウムは誘電率が大きい、キュリー点が 120°C ⁸⁾であるので、チタン酸バリウム自体の昇温実験から始め、灰化温度の 450°C を十分越えることを確かめたので下記のような容器を試作した。

450°C まで昇温するので、耐熱性の高い磁器ビーカーを用い、図3のように500 mlのビーカー

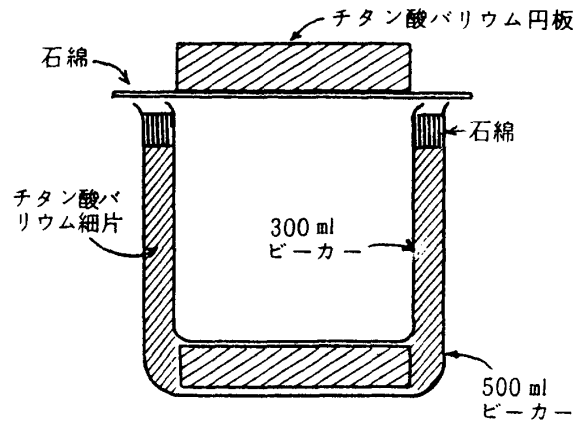


図3. 炭化・灰化用容器

500 ml 磁器ビーカーの内側に300 ml 磁器ビーカーを入れ、底部にはチタン酸バリウム円板、側壁にはチタン酸バリウムの細片を入れた。

の内側に、300 mlのビーカーを入れ、その隙間にチタン酸バリウムの細片を入れた。マイクロ波照射時はビーカーの上に石綿を置き、その上にチタン酸バリウムの円板を置いて上蓋とした。 $1,400\text{ W}$ で照射したときの昇温の結果を図4に示す。こ

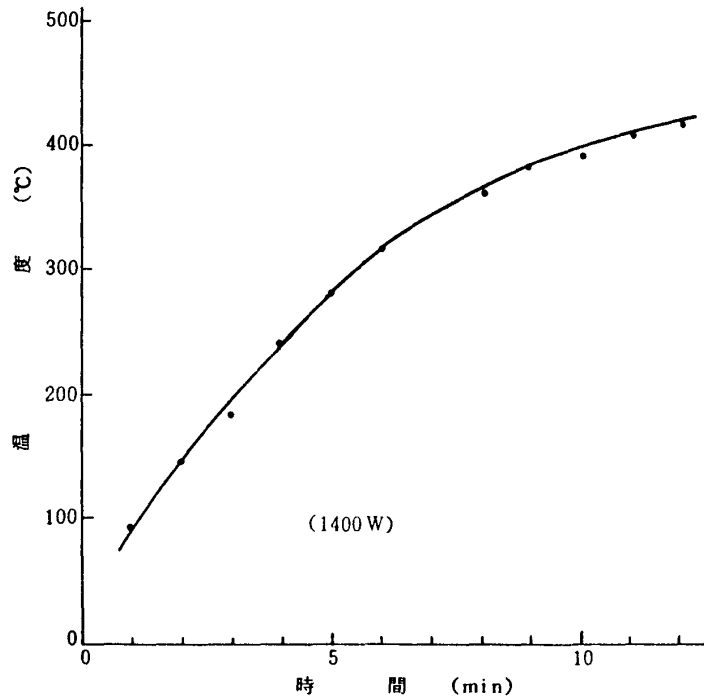


図4. 炭化・灰化用容器の昇温
マイクロ波出力 $1,400\text{ W}$ で加熱したときの容器底部の温度上昇

の結果目的の 450℃ は容易に得られるが、昇温の速度によっては磁器ビーカーが破損するので、さらに耐熱性の高いものを用いるか、速度を緩やかにしなければならず、本実験では昇温速度を遅くする方法を採択した。

炭化用も 2 l と 1.5 l のビーカーで同様な容器

を試作し、脱水試料の容積が大きい場合に用いた。

実際に炭化、灰化をするときは、容器の内側にアルミ箔で簡単な容器を作って、この中に試料を入れると、試料の取り出しが容易でさらにマイクロ波の遮蔽にもなることが分かった。

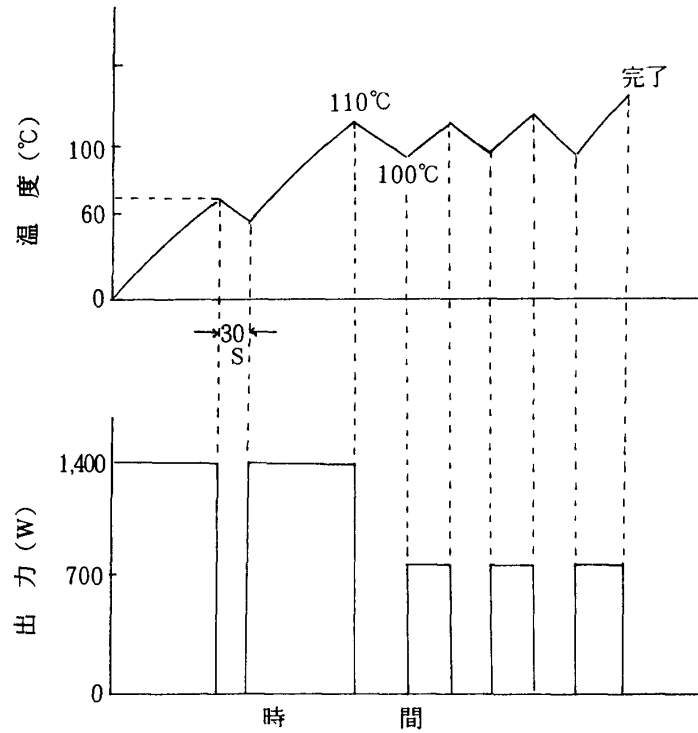


図 5. 脱水時の温度制御
下図はマイクロ波の ON-OFF の状況で上図は試料の温度を示している。

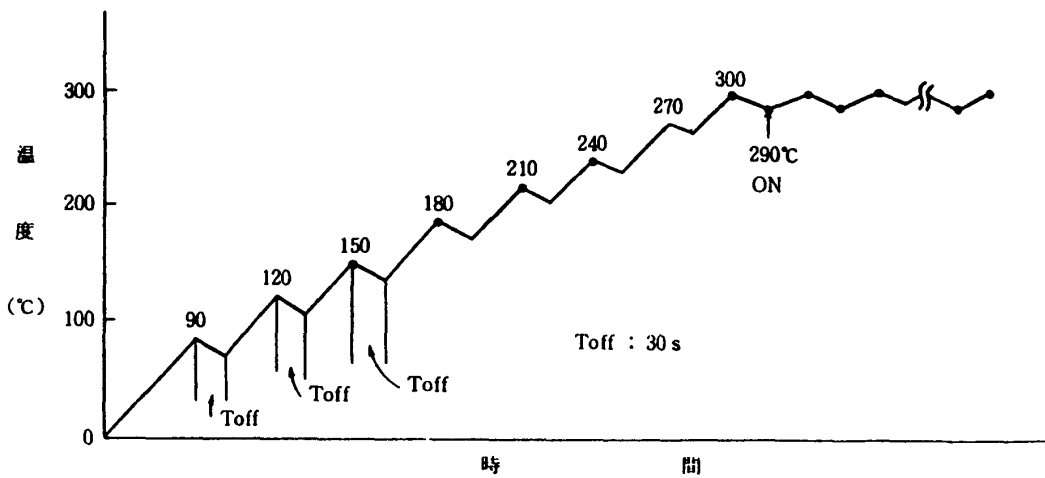


図 6. 炭化時の温度制御
90°C からは 30°C 毎にマイクロ波照射を 30 秒 (Toff) 停止する。

6. 温度制御法

(1) 概要

脱水、炭化、灰化の各段階での保持温度は次の通りである。

(a) 脱水

試料に水分を含んでいるうちは 100℃ に保たれるが、脱水が完了近くなると 100℃ 以上に上昇するので、基本的には 110℃ と 100℃ の間を保持させるが、試料によっては上限を 130℃ まで上げる場合もある。

(b) 炭化

炭化温度は 300℃ であるので、290℃ と 300℃ の間を保持するようにする。

(c) 灰化

灰化温度は 450℃ であるので、440℃ と 450℃ の間を保持するようにする。

(2) 脱水時の温度制御

脱水時の昇温は特に問題はないので、試料をそのまま連続照射してもよいが、本装置では 60℃ で 30 秒照射を停止（電源 OFF）するようにした。出力と温度の関係を図 5 に示す。図では最初 110℃ までの昇温は 1,400 W で、その後 110℃ の保持は 700 W で照射することを示している。試料によっては上限を 120℃ あるいは 130℃ にしている。

(3) 炭化と灰化時の温度制御

保持温度は前述の通り炭化が 300℃、灰化が 450℃ であるが、炭化の場合は図 6 に示すように、90℃ まではそのまま上げて 90℃ で 30 秒 OFF にして、その後は 30℃ 毎に 30 秒 OFF にしながら昇温する。これは急速加熱で容器を破損するのを避けるためである。300℃ に達したら OFF、290℃ まで降下したら ON にして温度を保持する。

灰化の場合は同様な昇温法で 450℃ で OFF、440℃ で ON の動作を繰り返し温度を保持する。

IV. 実験結果

1. 脱水

(1) 葉菜類

葉菜類としては、きゃべつ、きゅうり、松葉、米などについて実験したが、脱水されていく状態（重量が減る状態）をきゅうりについて図 7 に示す。

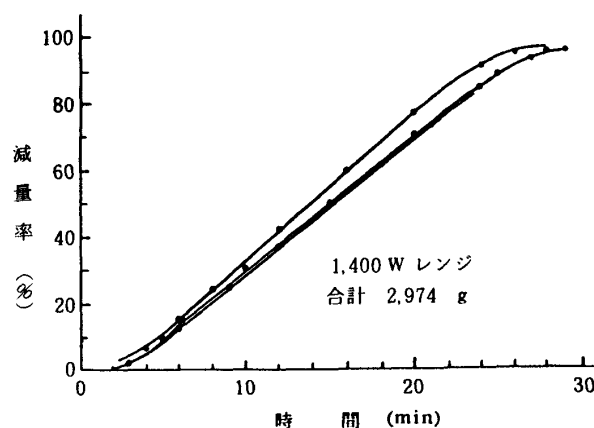


図 7. きゅうりの脱水
総量 2,974 g を 3 回に分けて脱水

(2) 魚介類

魚介類は、ほや、あいなめ、あわびの可食部のみについて実験した。試料の可食部を冷凍して、それを数 mm の厚さに切り、さらに数 mm 角の細片にした。魚介類は葉菜類と異なり脂質分が多いので上限温度が 110℃ では時間がかかるため、120℃ で行った。図 8 にあいなめの脱水例を示す。

(3) 各種試料の脱水

各種試料の脱水の例を表 2 に示す。表中の含水率は食品成分表⁹⁾によるものである。

表中の米は水分が少ないうえ、炭水化物が多いため温度上昇が早く、葉菜類のように 100℃ で蒸発が見られず、上限を 130℃ にしたが時間の割りには減量率が少ない。成分表の含水率に比べると

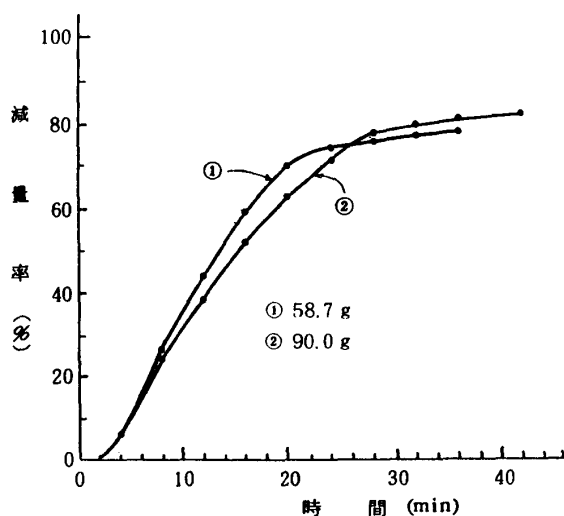


図 8. あいなめの脱水

表 2. 各種試料の脱水

試料	生試料 (g)	脱水試料 (g)	減量率 (%)	時間 (m)	含水率 (%)
きゃべつ	1,818.7	143.0	92.1	70	92.4
きゅうり	1,612.3	84.6	94.8	60	96.2
松葉	72.3	30.0	58.5	50	—
米	100.0	85.7	14.3	195	15.5
ほや	854.2	161.4	81.1	126	88.8
あいなめ	594.4	183.2	69.2	210	76.2
あわび	180.0	52.4	70.9	60	83.9

表 3. 各種試料の炭化と灰化

試料	脱水試料 (g)	炭化試料 (g)	灰化試料 (g)	全時間 (h)	灰/生 (%)
きゃべつ	142.2	58.9	22.9	14.7	1.26
きゅうり	84.0	35.6	7.2	7.5	0.45
松葉	30.0	21.3	1.0	6.6	1.37
米	93.0	71.4	14.0	7.5	14.0
ほや	161.4	97.7	25.5	23.6	2.98
あいなめ	183.2	80.8	24.4	36.3	4.15
あわび	52.4	20.3	7.1	11.1	3.94

葉菜類はほぼ脱水が完了しているが魚介類は水分が残っていると思われる。しかしこれらはそのまま炭化をするため特に問題はない。

2. 炭化と灰化

脱水試料を炭化し、引き続き灰化した例を表 3 に示す。炭化も灰化も試料によって回数が異なるが表中の量は合計である。きゃべつ、松葉およびあいなめの脱水、炭化及び灰化の写真を図 9～図 11 に示す。

V. 考 察

1. 灰化装置

(1) マイクロ波パワーユニット

初期にはマイクロ波の出力を可変にすることを考えたが、その後の実験により温度保持はマイクロ波の ON-OFF で容易にかつ確実に制御ができることを確かめたので、出力は一定のままを用いることにした。これはチタン酸バリウムの熱容量の大きさなどにより、マイクロ波照射を止めても

少しの間昇温が続くので、出力を減少させるだけでは昇温を早く止めることが難しく、照射を止めたほうが早いのである。

マイクロ波の出力は、試料の量や容器の大きさなどによって決められるが、特に灰化の段階では量が多すぎると固まって灰化し難いことがあるので、大型にするよりは適正規模で個数を増やしたほうがよい。本研究では 500 W と 1,400 W (700 W + 700 W) を用いたが、実際の量を考慮すると 1,000～1,400 W 程度は必要である。

またマイクロ波発振管の電源の容量は大きい方が望ましいが、各段階とも温度制御は電源の ON-OFF で使うので、連続運転用にする必要はない。現在市販の電子レンジは 30 分以上の連続使用は無理と言われているが、今回の実験で ON-OFF の操作で数時間動作させても過熱などの問題は起こらなかった。

(2) 温度測定

すでに述べたように、マイクロ波の遮蔽を 2 重にすることによって指示のばらつきを殆ど無くすることができたが、その後の実験によって温度測定の時間遅れが若干あり、温度制御に影響していることが分かった。これは容器底部に入れたチタン酸バリウムの量にもよると考えられ、量が多いと高温を保持しているとき、マイクロ波の吸収が多く、昇温速度が早くなり、ステンレスのパイプによる熱伝達に遅れが生じ、デジタル温度計の指示が実際の温度より低い値を示しており、これで制御すると設定温度よりも高い温度でマイクロ波照射を停止することになる。したがって熱電対の先端部をパイプより数 mm 出して容器に直接接触させた。今回の実験では熱電対を容器の内部に入れたが、これは今後図 12 に示すように容器壁にステンレスパイプを埋め込んでその中に熱電対を挿入することを予定している。

(3) 容器

脱水用の容器は磁器ビーカーそのもので特に問題は無いが、炭化用と灰化用はチタン酸バリウムの入れ方に注意が必要である。ここでは底部にチタン酸バリウムの円板を入れたが、加熱の度にこれが割れて細かくなり、それらの細片の間に隙間

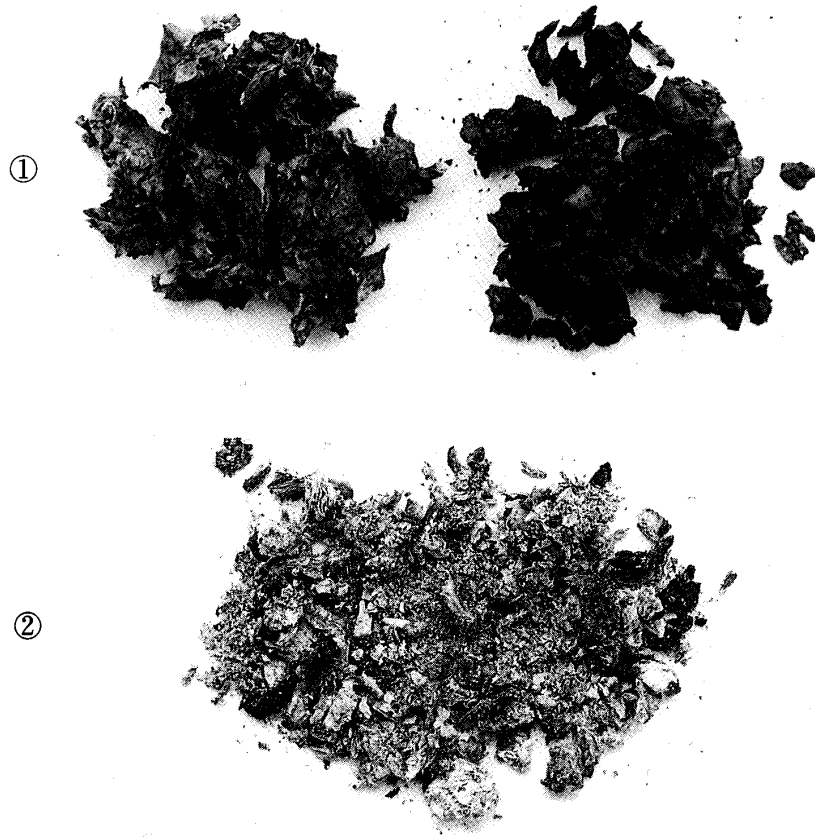


図9. きゃべつ

- ① 左側は脱水された試料で、右側は炭化された試料
- ② 灰化された試料

ができるとその細片の角に電波が集中してその近くだけが他の部分より高熱になり、ホットスポットができる。したがって熱電対の接触部位によって温度が異なることは底部の温度が一様でないため、炭化、灰化が均一にされないことになる。したがってチタン酸バリウムを直径2~3mmの球形にして底部と側壁に均等に入れることが必要となる。また従来の方法でもそうであるように、各段階の途中で試料を攪拌することは望ましいことであろう。

容器の材質については、昇温速度に注意すれば破損しないので現在の磁器で十分である。脱水用はパイレックスガラスでも特に問題は無く、ガラスの場合は内部の観察ができて好都合である。

(4) 排気と雰囲気調整

本実験では、脱水の水分排気は上蓋に直径10mmの穴をあけて、そこからガラスパイプで外部に導いたが、上蓋の密封性がよくなく、パイプも細かったので十分な補水がなされなかった。このパイプは直径30mm程度は必要である。

雰囲気調整については、すでに述べたように炭化時に窒素ガス、灰化時に空気を送るがこの空気送風の方法にまだ問題がある。これは炭化物が固まりになっていて表面が灰化すると空気が内部に届かないため灰化が困難になるので、やはり量によっては途中で攪拌することも必要になるろう。

2. 温度制御法

(1) 脱水

脱水は温度が高くないので、昇温速度は特に問

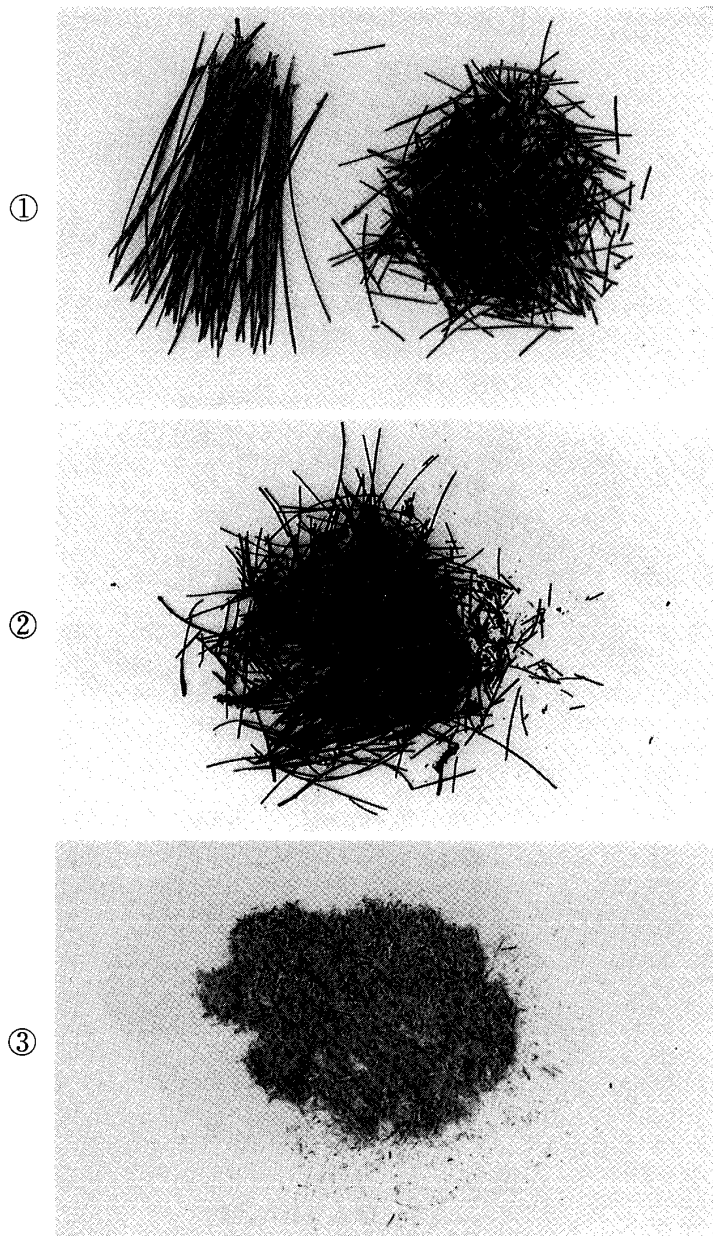


図 10. 松葉
① 左側は生の試料で、右側は脱水された試料
② 炭化された試料
③ 灰化された試料

題にならない。熱電対が脱水試料の中にあるため、水分の多い葉菜類はしばらく水分の沸騰により 100℃ が維持され、脱水が近づいたら 100℃ 以上に上昇していく。これは試料自体の温度が上がるのと同時に容器の温度も上昇するためであるが、このときの最高温度をその試料によって決めておき、10℃ 位の温度範囲でマイクロ波を ON-OFF

すれば容易に脱水されることが確かめられた。殆どの試料は上限 110℃、下限 100℃ でよいが、110℃ になってからの時間は試料の種類と量によって予め求めておく必要がある。

脱水に関して特殊な試料は米で、炭水化物が多く水分が少ないので、蒸発時の 100℃ 維持時間が殆ど無く、急速に 100℃ を越えてしまう。上限

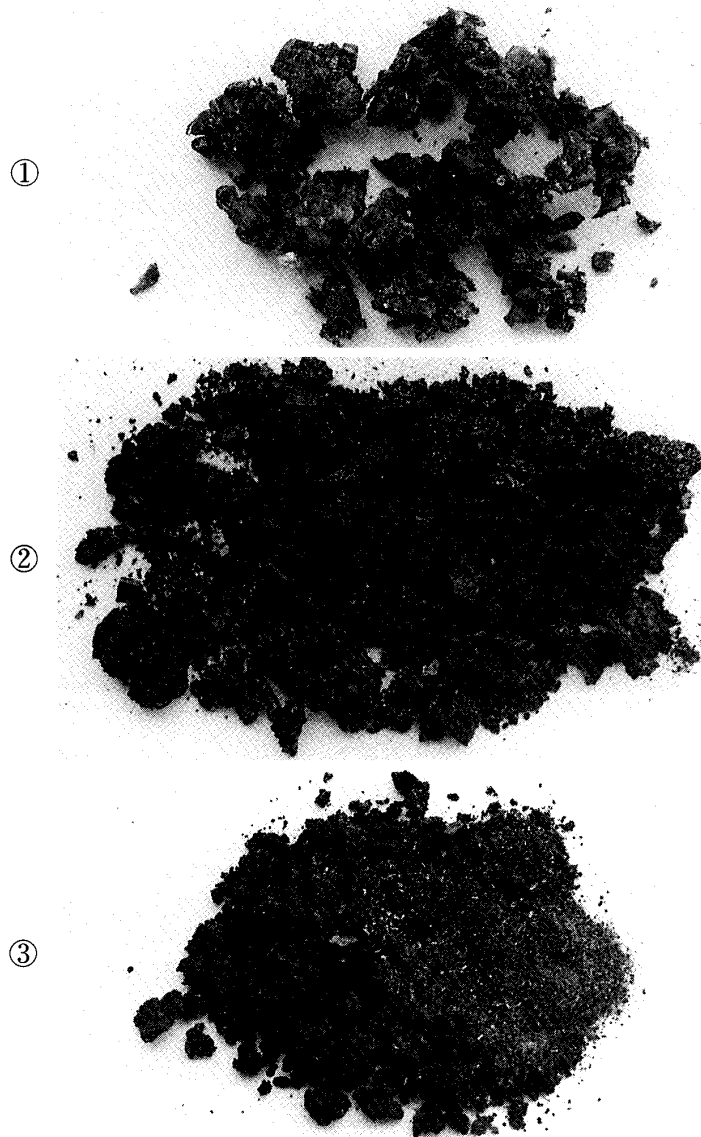


図 11. あいなめ
① 脱水された試料
② 炭化された試料
③ 灰化された試料

110℃では殆ど脱水されないことと、脱水での試料容積に変化が無いことを考慮し、120~130℃を或る時間保持し、続けて炭化の段階に移行するほうが望ましいことが分かった。

(2) 炭化と灰化

昇温の方法はすでに述べた通りで、急加熱による破損を防止するため30℃毎に30秒マイクロ波照射をOFFにすると、300℃あるいは450℃まで昇温するのに20~30分かかるが、この昇温速度で

は破損が起こらない。昇温速度とON-OFF時の温度の変化は容器壁に入れたチタン酸バリウムに依存するが、多すぎると温度制御が難しくなるので、現在は経験的に求めている。現在は砕いた細片を入れているが、尖鋭な所があるとマイクロ波がその部分に集中して放電を起こし、ホットスポットのようになるので、チタン酸バリウムは直径2~3mmの球形にすればよい。

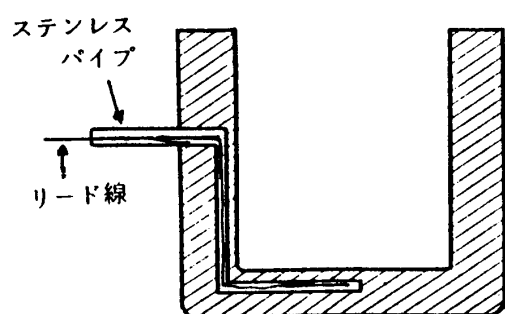


図12. 熱電対の挿入法

3. 実験結果

(1) 脱水

脱水に関しては葉菜類はマイクロ波利用が容易であり、すでに報告⁶⁾されているように温風法に比べると急速乾燥であり、また食品成分表の含水率と比べて殆ど脱水されていることが分かる。

きゅうり、きゃべつ、大根等は水分が多く、脱水が顕著に見られるが、前述したように松葉と米は水分が少なく、容積変化も少ないので、これらは脱水時の温度を高くして、一部炭化に進ませるか、直接炭化したほうが能率的である。

魚介類は可食部のみで細かく砕いた状態ではあるが、表面が先に乾燥して固まるため完全に脱水するのは困難である。実験では脱水の時に表面が焦げて炭化の状態になり、その部分でマイクロ波が放電を起こし、点火したことがあったが、点火には注意しなければならない、途中で取り出してその固まりを砕くことも考える必要がある。

米等の試料を考慮しても、マイクロ波照射による脱水は、内部からの加熱であるため極めて効率の良い方法と言える。

(2) 炭化と灰化

炭化は300℃で行うので、温度上昇時に200℃位から発煙が始まり、300℃を保持して発煙が止まるとほぼ炭化が終わり、重量が軽くなる。脂質分の多い魚介類は葉菜類に比べると時間を要する。多くの脱水試料は炭化しても容積は変わらないが、米は炭化時に脱水試料の2~3倍程度に膨張するので、このことを考慮して量を決めなければならない。

灰化は450℃で行うため時間を要することは当

然であり、灰化時間は表3の全時間の60~80%を占めている。灰化の時も点火して燃焼することには注意しなければならない。

VI. 結 論

本研究よりマイクロ波による灰化法について以下の結論が得られた。

1. 灰化装置

本研究では市販の電子レンジを使用した環境試料として灰化するための生試料の量が2~5kg程度であることを考慮すると、マイクロ波の出力は今回用いた1,400W程度で十分である。ただしマイクロ波発振器の電源に少し余裕を持たせる必要がある。

脱水、炭化及び灰化の各段階の温度制御は、マイクロ波のON-OFFで十分であり、温度測定は熱電対をマイクロ波から遮蔽することにより目的に対する精度は得られた。

現在1台のマイクロコンピュータで1台の装置を制御しているが、1台のコンピュータで数台の装置を制御することも可能であり、各段階用の装置を決めておけば並列操作で能率良く灰化ができる。

2. 容 器

脱水用は材質の点でも破損等の問題はなく、従来の温風に比べて時間短縮が大きい。

炭化、灰化用容器はチタン酸バリウムの細片を容器壁に入れて加熱するが、この細片に尖端部があるとマイクロ波が集中してホットスポットができて均一温度にならないので、直径2~3mmの球形にすればよい。チタン酸バリウムの固定には石綿がよい。石綿はマイクロ波を良く吸収し、容器の保温にも適当である。

3. 環境試料

本研究での環境試料は食品に限り、それも葉菜類と魚介類の一部である。米のように特殊なものもあるが、原理的には他の食品にも適用可能である。

今回牛乳については初期的実験しかなかったが、牛乳の場合は表面に脂肪膜ができて水分蒸発が妨げられるだけでなく、沸騰で噴きこぼれるこ

とがあり、脱水時の温度やマイクロ波出力等について検討する必要がある。

4. 本灰化法

炭化と灰化は加熱容器を使用するので、原理的には従来の電気炉と同じであり、特に灰化は450℃で行うので時間的にも短縮されないが、脱水の段階でかなり短縮できることと、炭化、灰化も昇温時間が早いので、現在行われている温風乾燥と電気炉法で葉菜の一部でも数十時間要しているのに比べると、全体の時間は大きく短縮されている。またコンピュータによる操作が容易であり、試料の種類、量によってそれぞれの段階のプログラムを作っておけば、試料のセットのほかの操作は殆ど自動化される。

緊急時等に少しでも早く情報を得るためにも試料の前処理の迅速化と省力化が望まれて研究もされているが¹⁰⁾¹¹⁾、まだ改良の余地は多いが本研究でその一方法の可能性を示した。

謝 辞

本研究を行うに当たり、チタン酸バリウムを提供して下さったトーキン川崎賢治氏に深謝する次第である。

文 献

- 1) 五十嵐修一, 松浦広幸, 徳山秀樹ほか: 原子力発電所周辺の環境試料の核種分析結果, 福井県衛生研究所年報, **26** (1987), 108-146, 1988
- 2) 宮城県原子力センター, 東北電力: 女川原子力発電

- 所環境放射能調査結果, 女川原子力発電所環境放射能及び温排水調査結果報告書, **8**, 95, 1989
- 3) 荒井香陽子, 木村 寛, 河村太郎: 食品の放射能バックグラウンド調査, 横浜市衛生研究所年報, **29** (1989), 99-100, 1990
- 4) 放射線審議会放射能測定部会編: センチューム137分析法, 日本放射性同位元素協会, 東京, 1963
- 5) 放射線審議会放射能測定部会編: 放射性ストロンチウム分析法, 日本放射性同位元素協会, 東京, 1963
- 6) 高木伸司, 中岡 章, 福島政法ほか: 環境放射能に関する研究(その8)—マイクロ波脱水法による食品等試料の前処理の迅速化, 電力中央研究所283041, 1984
- 7) 佐藤博夫, 柴田長吉郎: 放射性廃棄物処理へのマイクロ波技術の応用, 第19回理工学における同位元素研究発表会, 5P-II-11, 1982
- 8) 柳井久義, 酒井善雄: 強誘電材料および圧電材料, 電気材料, 18版, コロナ社, 東京, 1972, p. 236~242
- 9) 科学技術庁資源調査会編: 食品成分表, (4訂)一橋出版, 東京, 1987
- 10) Cooper, E.L.: A new IAEA coordinated research program on rapid instrumental and separation methods for monitoring radionuclides in food and environmental samples, Energy Can Ltd, AECL-9959, 207-238, 1989
- 11) 本郷昭三, 竹下 洋, 内田滋夫ほか: 環境放射能迅速評価システム, 放射能調査研究報告書, 1989, 83-86, 1990