

コンブ乾燥システムの開発

多田 達実, 鈴木 慎一, 浦池 隆文, 今岡 広一, 畑沢 賢一,
飯田 憲一, 保科 秀夫, 鶴谷 知洋, 立松 宏一*, 下ノ菌 慧**,
福士 暁彦***, 阪本 正博***, 辻 浩司****

Development of Kelp Drying System

Tatsumi TADA, Shinichi SUZUKI, Takafumi URAIKE, Kouichi IMAOKA,
Kenichi HATAZAWA, Kenichi IIDA, Hideo HOSHINA, Tomohiro TSURUYA,
Kouichi TATEMATSU*, Kei SHIMONOSONO**, Akihiko FUKUSHI***,
Masahiro SAKAMOTO***, Kouji TSUJI****

抄 録

本道の基幹漁業であるコンブ漁業の生産量を維持・拡大するため、除湿機能を重視した新たな乾燥システムを開発した。乾燥コンブの生産地で実証試験を行い、従来の乾燥装置に比べ一次エネルギー換算で59%の省エネ効果があることを確認した。また、乾燥室内の温度推移からコンブの乾燥状態を推定する手法を考案し、乾燥を自動停止する制御を実現した。

キーワード：コンブ乾燥，ヒートポンプ乾燥，省力化，省エネ化

Abstract

Kelp fishery is a key fishery for Hokkaido. We developed new kelp drying system using the dehumidification drying function to maintain and enlarge amount of production of the kelp fishery. We demonstrated the system at the place that performed dried kelp production. And we confirmed that energy saving effect of 59% based on primary energy conversion could be expected in comparison with conventional drying equipment. In addition, we devised technique to estimate dry condition of kelp from temperature change in the storage of drying and realized control to stop drying automatically.

KEY-WORDS : kelp drying, heat-pump drying, labor saving, energy saving

* 建築研究本部, * Building Research Department

** 北方建築総合研究所, ** Northern Regional Building Research Institute

*** 釧路水産試験場, *** Kushiro Fisheries Research Institute

**** 中央水産試験場, **** Central Fisheries Research Institute

事業名：重点研究

課題名：道産コンブの生産安定化に関する研究

1. はじめに

近年、本道の基幹漁業であるコンブ漁業の生産量は減少傾向が続いており、漁家経営へ多大な影響を及ぼすことが危惧されている。コンブ生産量減少の要因としてコンブ漁業者の減少や高齢化・後継者不足等による影響が指摘されおり、重労働であるコンブ乾燥工程の省力化技術の開発が強く要望されている。また、乾燥コンブの生産においては、利益率を上げることは、産業としての魅力を向上させ生産量の維持に繋がることから、生産コストの低減、中でも燃料費の削減が重要である。そのため、本研究ではコンブ乾燥の自動化と省エネ化を可能とするシステムの開発に取り組み、除湿機能を重視した新たなコンブ乾燥システムを開発した。また、このシステムを基にし、協業化のための大規模なシステムの基本設計を行い、実用スケールでの省エネ効果や省コスト効果についての検討を行った。

2. 現状作業分析と開発目標

2.1 釧路・根室地域における実態調査

乾燥工程の課題や、システム設計の条件を把握するため、既存のコンブ乾燥施設を対象に、主に機械乾燥が行われている釧路・根室地域で実態調査を行った¹⁾。

コンブ生産は採取から製品化に至るまで、基本的に漁家単位で行われており、乾燥施設も漁家ごとに有している。また、調査地域のコンブは「ながこんぶ」であり、名前のとおり長さが4～15m程度と非常に長いのが特徴である。

図1にコンブ乾燥施設の例を示す。調査対象としたコンブ乾燥施設は、釧路町昆布森漁協管内1棟、根室市歯舞漁協管内2棟の計3棟である。



図1 コンブ乾燥施設の例

図2にコンブ採取から出荷までの作業工程を示す。昆布森、歯舞地区とも、天然コンブを採取しており、操業は好天時に限られる。したがって、原則として、採取したコンブは干場において一次乾燥（天日乾燥）が行われ、午後にコンブを乾燥施設に移して、機械乾燥で仕上げる。なお、昆布森地区では、天日乾燥のみで仕上げる日もある。また、採取後、天候が悪化した場合には、天日による一次乾燥を行わず、はじめから機械乾燥を行う場合もある。

機械乾燥後、コンブを棒から外して結束するため、再度水分を含ませて軟化を行う必要がある。軟化処理の方法としては、スプリンクラーなどによる水分噴霧を行う場合と、高温な外気を導入する場合がある。

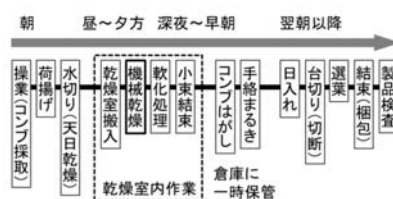


図2 コンブ採取～出荷の作業工程の例（釧路・根室地区）

表1に調査した乾燥施設の主要仕様の一覧を示す。昆布森Aは2階建てに相当する高さがあり、乾燥運転時に棹掛けしたコンブを吊り架台によって上方に移動している。概ね落石岬より西側の地域では、この高軒高の乾燥施設を採用している。歯舞A、Bは手の届く位置に固定式の架台を設けている。

熱源はいずれもA重油で、熱風式のコンブ乾燥機を使用している。その他の機械設備として、排気ファン及び首振り型の天井扇を有するほか、歯舞Aのみ水分噴霧のためのスプリンクラーを設けている。給気は機械室に設けられた常時開放の換気フードから行われ、機械室と乾燥室は上部でつながっているため（開閉機構を設けている場合もある）、乾燥機には外気と乾燥室内の空気が混合して取り込まれる。

表1 乾燥施設主要仕様

| | 昆布森 A | 歯舞 A | 歯舞 B |
|---------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 建屋構造 | 木造 | 木造 | 木造 |
| 断熱 | なし | 壁のみ GW 充填 | 壁のみ GW 充填 |
| 床面積 | 41.4 m ² | 51.6 m ² | 29.8 m ² |
| 熱源 | A 重油 | A 重油 | A 重油 |
| 熱源出力 | 174kW | 233kW | 不明 |
| 熱源送風機 | 7,200m ³ /h×3 | 10,200m ³ /h×3 | 7,620m ³ /h×3 |
| 排気ファン | 3,720m ³ /h×4 | 5,040m ³ /h×2 | 4,800m ³ /h×2 |
| 天井扇 | 50cm×4 | 60cm×5 | 不明×6 |
| スプリンクラー | なし | あり | なし |

2.2 その他の地域の実態調査

羅臼漁協の協力を得て、羅臼地区の乾燥施設7棟と保管庫4棟で温湿度の実測調査を行った（図3）。羅臼地区では、高級出汁昆布である「りしり系えながおにこんぶ」（通称：

羅臼昆布)が生産されている。かつては、天日乾燥が行われていたが、40年程前より機械乾燥が導入され、現在ではほぼ全戸が機械乾燥を行っている。特に、養殖コンブは天候に関わらず連日採取を行うため、生の状態から機械乾燥を行っている。

また、南かやべ漁協の協力を得て、南茅部地区のコンブ乾燥施設の調査を行った(図4)。同地区は、道内最大のコンブ産地で、「まこんぶ」が生産されている。養殖コンブが主であり、干場がないため、全量機械乾燥を行っている。

コンブの長さは3メートルほどで、ピンに挟んで吊るしている。レール式の架台を採用している乾燥施設が多いのが特徴で、水平2方向、さらに上下方向に台車が動くよう工夫されたものがある。乾燥施設に隣接して、屋外に水切り場を有し、水切りによって機械乾燥時間の短縮を図っているケースもある。



(a) 乾燥施設の外観

(b) 乾燥室内

図3 羅臼地区のコンブ乾燥施設



(a) 乾燥施設内

(b) コンブかけ外し場

図4 南茅部地区のコンブ乾燥施設

2.3 地域別のコンブ乾燥方法

以上の実態調査のほか、一般社団法人北海道水産物検査協会への聞き取りや文献²⁾による情報を参考に、コンブの機械乾燥に関する実態を以下に記す。機械乾燥の方式は多様であるが、漁協単位で見ると地域内ではほぼ同じ方式が採用されている。

2.3.1 機械乾燥への依存度

コンブの種類(1日で乾燥するかどうか)、生産量、気象条件、操業形態(旗採りを行うかどうか)、天然か養殖か、干場の状況、品質の考え方などにより、各地域により機械乾燥への依存度が異なる。

①原則として天日乾燥で仕上げる地域(乾燥施設の保有は一

部に留まる地域)

いわゆる「旗採り」により、好天時のみ操業を行う地域では、天日乾燥が主体である。現在でも日高地方や宗谷地方の一部では、乾燥施設を保有せず、天日乾燥だけで仕上げる地域がある。日高地方では、天日乾燥のほうが仕上がりの色艶が良いとされることや、宗谷地方では、生産量が少ないため機械乾燥のコストメリットが出にくいことも、天日乾燥が維持されている要因になっていると考えられる。

②補助的に機械乾燥を行う地域(乾燥施設を保有するが、好天時は天日乾燥だけで仕上げる地域)

釧路地方は、天日乾燥主体であるが、途中から天候が悪くなった場合には機械乾燥を使用する。これは、釧路地方特有の気象条件によるものと考えられる。宗谷地方にも同様の地域がある。

③一次乾燥後に機械乾燥を行う地域

根室地方では天日による一次乾燥後、機械乾燥で仕上げることを基本としている。これは、気象条件のほか、根室地方のコンブの特徴として、天日で上げると焼けたように色が変わることが要因になっている。

④生から機械乾燥を行う(生掛け)

地域養殖コンブは天候に関わらず採取することができるため、基本的に機械乾燥を行っている。このうち、利尻や道南の上磯以西では天日による一次乾燥を併用しているが、南茅部や羅臼では生から機械乾燥を行っている。南茅部は干場が十分に確保できないことや、機械乾燥のほうが黒く様に仕上がること、羅臼ではテトラポットによる干場の環境変化や、機械乾燥のほうが艶や旨味の点で優れているとされることが機械乾燥導入の要因となっている。また、天日乾燥が可能な地域でも、雄武など他の漁種との兼業のため、作業上の効率を考えて生から機械乾燥としている地域もある。

2.3.2 機械乾燥を行う時間

釧路など補助的に機械乾燥を行う地域では、天候次第で2時間~10時間以上(生掛けの場合)と、日により変化する。基本的に20時頃までに仕上がるよう、タイミングを見計らって、干場から乾燥施設にコンブを移すこととなる。

根室では一次乾燥後、午後のほぼ一定の時間に乾燥施設に移すが、天候の具合により、乾燥終了が深夜0時前後になるケースが見られる。

南茅部では、乾燥所要時間は8~10時間程度で、同じ乾燥施設で1日2回乾燥させる場合と、乾燥施設を複数保有し、併行して乾燥を行う場合がある。1日2回乾燥させる場合は、2回目を翌朝までかけるか、乾燥機を高出力として22時頃までに終わらせるかであるが、時間的な作業負担を減らすため、乾燥施設を複数保有し、当日18時頃までに乾燥を終わらせるケースも増えてきている。

羅臼では、乾燥時間が20時間前後と長く、深夜2時から早朝6時ごろの時間帯にコンブの掛け外しを行っている。

2.3.3 コンブの干し方

①棹に掛ける

「ながこんぶ」は長いので、棹に掛けて吊す。棹はコンブの変色や滑りを防止するため、ネットで覆われている。釧路地区の場合、コンブを二つ折りで棹に掛け、すべて掛け終わった後、架台ごと滑車で上方に移動させる。それでもコンブが床につくほど長いときは、一部M字状に折り返す。根室では、最初から棹にコンブをM字状に折り返して掛ける。

乾燥終了後はコンブに柔軟性がなくなるため、そのままでは棹から外せなくなる。そのため、再度コンブに水分を含ませる軟化処理を必要とし、排気ファンを用いた強制給気により、朝方の高温な外気を導入するか、スプリンクラーなどによる水分噴霧が行われる。根室地区では水分噴霧を行うケースも多いが、釧路と比べて根室のコンブは耳があり互いに付着しやすいことも影響しているとされる。通常外気導入で軟化処理可能な場合でも、生から乾燥を行った場合は、コンブ同士が付着した部分を剥がすため、軟化処理が必要となる場合もある。

②ピンに挟んで吊す

長さの比較的短い羅臼昆布や「まこんぶ」は、ピンで挟んで棹から吊す。コンブの頭を上にするかしっぽを上にするかは地域により違いがある。南茅部では、ピンの位置が高さ3m以上にあるため、脚立に上って掛けるか、上下、水平移動機構を持つ架台を用いている。ピンに挟んで吊すケースでは、乾燥室内での軟化処理は必須ではない。

③寝かせて並べる

実態調査を行った地域では行われていなかったが、渡島の一部や宗谷では、のし昆布を作るため、あらかじめ切った昆布をキャスト付きの台車に寝かせて並べる方法を採用している。

2.4 既存乾燥施設における課題

実態調査から、既存乾燥施設においては、以下のような課題が挙げられる。

- ・既存乾燥施設はすべて熱風乾燥を採用しており、排気による損失が大きい。また、熱源は灯油または重油のため、原油価格変動の影響を受けやすい。
- ・乾燥中は、乾燥むらの抑制や軟化処理のため、何度も乾燥室に入っただけの操作が必要であり、時間的、身体的な負担が大きい。
- ・コンブ生産は、コンブの採取から製品化まで、漁家単位で行われている。早朝から深夜まで人手を要する作業が断続的に生じ、少子高齢化、核家族化が進む中で、家族による作業は難しくなる状況が生じている。一方で、従来からア

ルバイトに頼る部分も多かったが、近年はアルバイトの確保が非常に厳しくなっている。

- ・従来、天日乾燥主体の地域においても、アルバイトの確保困難などを背景に、生がけ機械乾燥を導入する動きが見られる。
- ・建屋については、南茅部の一部乾燥施設を除き木造で、簡素な構造であるが、良好な状態で維持されている。建屋はそのままとし、乾燥機のみ20年程度で入れ替えを行っているケースが多い。

2.5 システム開発の目標

本研究では、投入エネルギーよりも多くの熱エネルギーを得ることが可能なヒートポンプを用いて、省エネ機能を備えた乾燥実証プラントを設計・製作し、乾燥施設内の温湿度や風速等をモニタリング・制御を行いながら、コンブ乾燥の自動化を可能とする乾燥システムを開発することとした。

具体的には、現行の乾燥施設に対して燃費50%減を目標とし、制御アルゴリズムの検討や性能改善について、生産現場（昆布森）での各種試験やシミュレーションを行った。また、乾燥実証プラントでの試験結果を踏まえて協業化を想定した大規模なシステムの検討を行った。

3. モデル試験機による基礎技術開発

ヒートポンプによる加温除湿乾燥法を用いた実証プラント設計の知見を蓄積することを目的に、市販のヒートポンプ式除湿器を用いた簡易なモデル試験機による基礎的な乾燥試験を行った。

3.1 モデル試験機の製作

モデル試験機の構成を図5に、外観を図6に、乾燥ボックス内空気入口・出口の様子を図7に示す。

モデル試験機は、図5に示すように一般に市販されている家庭用のヒートポンプ式除湿器（コロナ製：CDM-1413、除湿能力：0.5L/h）、乾燥ボックス、及び電動三方弁で構成される。基本的には除湿機から吐出した乾燥空気が乾燥ボックスを経由して除湿器に戻る「循環回路」とするが、空気を長時間循環することにより温度が上昇し、除湿機の使用範囲（5～35℃）を超えて除湿機が停止するような場合には、除湿器から吐出した乾燥空気が乾燥ボックスを通った後外気に排出される「一方通行回路」への切り替えが可能となっている。

なお、乾燥ボックスは実際のコンブ乾燥室を模擬するため、コンブを掛ける棹を想定した棒を4本設置できるようにし、乾燥中の状態などが目視で確認できるように透明のアクリル板で製作した。

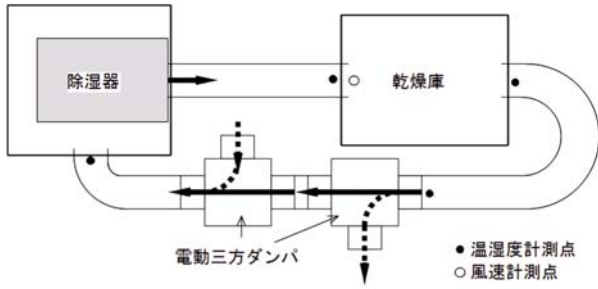


図5 モデル試験機の構成

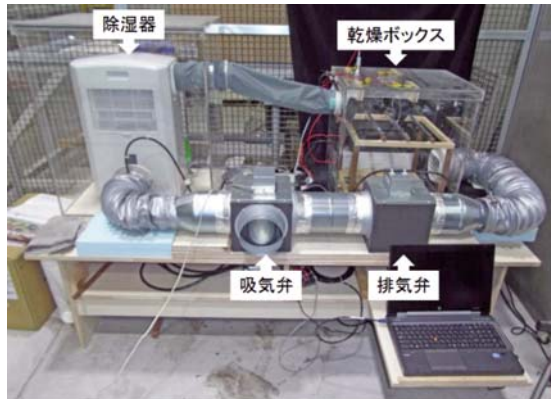


図6 モデル試験機の外観



図7 乾燥ボックス内空気入口・出口の様子

3.2 基礎試験

3.2.1 模擬コンブを用いた試験方法の確立

a) 模擬コンブの選定

基礎試験は、乾燥ボックス内の空気の流れに対する被乾燥物の配置方法が乾燥状態に与える影響を把握することを目的としている。実際のコンブは用いず、品質などが一定である工業製品を模擬コンブとして用いることとし、一般に市販されている製品の中から最適な材質の選定を行った。選定の条件は、実際のコンブと同程度の吸水性を持ち、任意の寸法に切断できることとし、ポリビニルアルコール製の不織布「PVA超吸収クロス」(ワコー㈱製)を選択することとした。

図8に、水戻しコンブ、一次乾燥コンブ、生コンブ、PVA(模擬コンブ)、及び比較対象としてEPDM(エチレンプロピレンジエンゴム製品)の乾燥特性曲線を示す。

この図から、選定したPVA超吸収クロスはEPDMと比べ乾燥特性が生コンブと比較的近いことがわかる。なお、実際

のコンブを用いることで発生する保管状態や個体差による試験条件の変動や使用量の制約などの問題を避けることができたことを付記する。

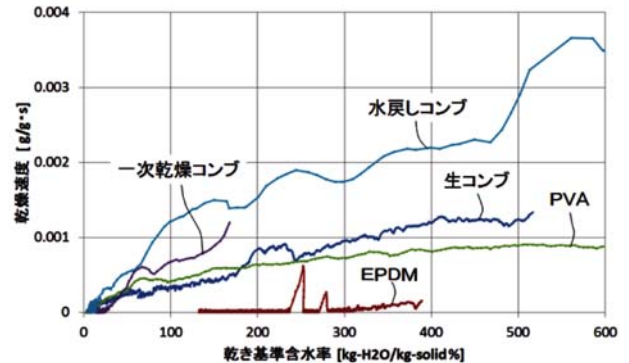


図8 各種材料の乾燥特性曲線

b) 試験方法

模擬コンブの寸法は幅300mm×長さ500mmとし、約300mmの高さに設けた4本の棹に長さ方向で二つ折りにして1枚ずつ掛け、合計4枚の模擬コンブにより試験を行った。また、模擬コンブの含水率は試験開始時に300%d.bとし、試験時間は30分とした。これは、300%d.b.以上含水させた場合、棹に掛けた状態で1時間放置すると水分が下端に集まり滴下し始め蒸発水分量の計測に誤差が生じることによる。

試験の手順を図9に示す。

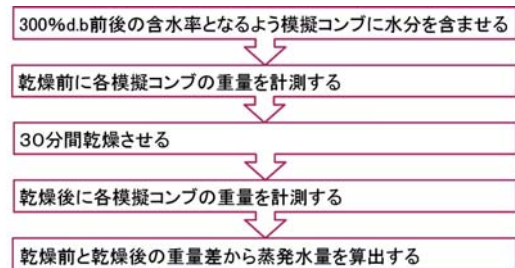


図9 試験の手順

3.2.2 通風方法に関する基礎試験

空気入口の高さを実際の乾燥室と同様に棹よりも低い位置とした試験Ⅰ、空気入口側の壁を二重とし、内側壁を空気分散板として模擬コンブに均一に風が当たるよう直径25mmの孔を20カ所に設け、各孔の風速を4.5~7.0m/sに調整した試験Ⅱについて、それぞれ乾燥空気の流れに対し模擬コンブの棹を対向とした配置(対向配置)と平行とした配置(平行配置)で乾燥試験を行った。

試験Ⅰ(対向配置)、試験Ⅰ(平行配置)、及び試験Ⅱ(平行配置)のイメージを図10~12に、試験Ⅱ(平行配置)の様子を図13に示す。

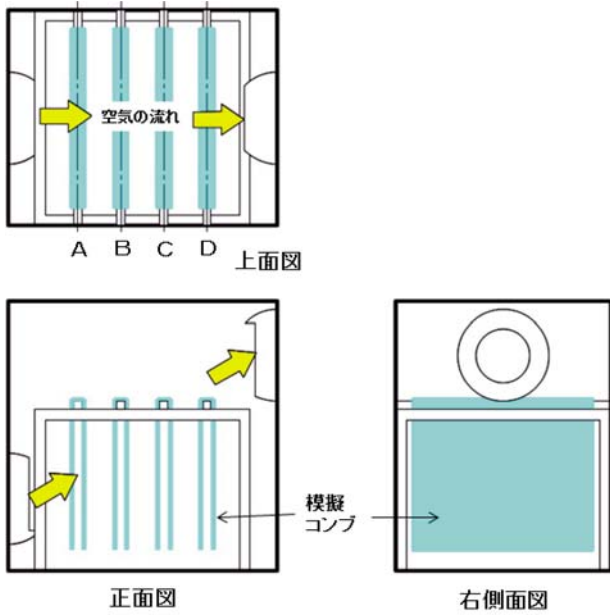


図10 試験 I (対向配置)

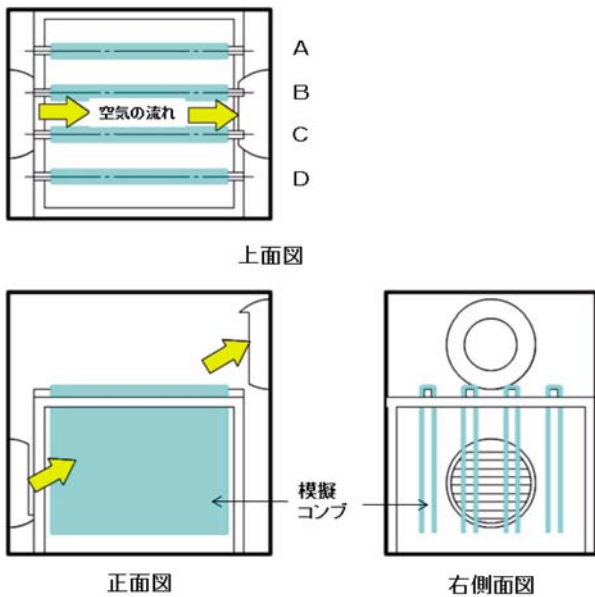


図11 試験 I (平行配置)

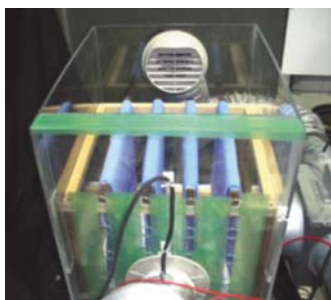


図13 試験 II の様子

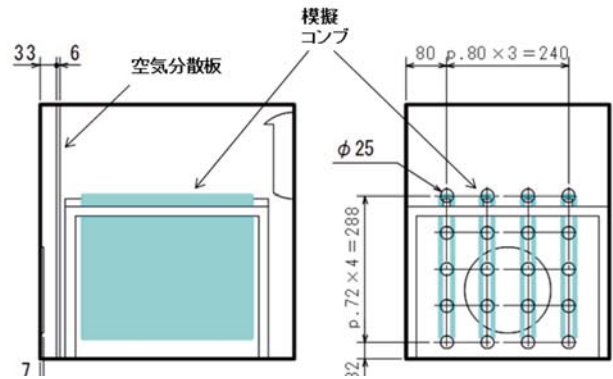


図12 試験 II (平行配置)

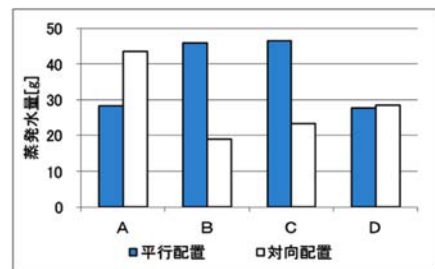


図14 試験 I (平行配置, 対向配置) の蒸発水量

表 2 試験結果

| | | 蒸発水量 合計 [g] | 蒸発水量 割合 [%] | 最小蒸発 水量 [g] |
|-------|----|-------------------|-------------------|-------------------|
| 試験 I | 平行 | 148.3 | 59.3 | 27.6 |
| | 対向 | 114.2 | 45.7 | 19.0 |
| 試験 II | 平行 | 164.2 | 65.7 | 34.1 |

試験の評価は、各試験に用いた模擬コンブ（4枚）の蒸発水量合計、除湿器の除湿能力に対する蒸発水量の割合、及び乾燥完了時間に影響を与える最も蒸発水量が少ない模擬コンブの蒸発水量（最小蒸発水量）により行った。なお、4枚の模擬コンブに見られる僅かな厚みの差が、蒸発水量などに影響を与えることがわかったため、試験はA～Dの位置に配置する模擬コンブが全て異なる4通りの組み合わせで行い、各位置の平均値を試験結果とした。

試験 I における平行配置と対向配置の模擬コンブ毎の蒸発水分量を図14に、試験 I と試験 II の試験結果のまとめを表 2 に示す。

図14から、対向配置は乾燥ボックス内空気吹出口に最も近いAの模擬コンブは蒸発水量が多いが、それ以外の模擬コンブはAの半分程度となっていることがわかる。また、平行配置は空気入口と出口がある乾燥ボックス内の中心線に近い2枚（BとC）の蒸発水分量が多いが、外側の2枚（AとD）は少ないことがわかる。

表 2 から、試験 I においては蒸発水量合計、蒸発水量割合、

及び最小蒸発水量のいずれも平行配置の方が多く、特に最小蒸発水量については、対向配置のおよそ1.5倍であることがわかった。また、試験Ⅰ（平行配置）と試験Ⅱ（平行配置）を比較すると、蒸発水量合計、蒸発水量割合、及び最小蒸発水量のいずれも試験Ⅱの方が多ことがわかった。

以上の結果から、被乾燥物に均一に空気が当るようし、コンブの配置は空気の流れに平行とすると良いことがわかった。

3.2.3 運転制御に関する基礎試験

実証プラントへの組み込みを想定した計測システムについて、乾燥工程における温度・湿度データの傾向の把握と、計測データから被乾燥物の乾燥状況を推定する方法を見つけるため、各種条件における試験機内を循環する空気の温湿度変化の計測・解析を行った。

計測データの一例（試験Ⅱ）を図15に示す。図中、約30分間～1時間毎に各データの値が一瞬下がっているのは、乾燥ボックスの蓋を開けて模擬コンブを取り出し、含水率を計測したことによる。

この図から、乾燥ボックス入口温度は乾燥開始から約1時間後に最高の約43℃となる。その後、乾燥が進むに伴い、乾燥ボックスにおける入口と出口の重量絶対湿度（単位重量の空気を含む水蒸気重量を示す値）の差はいずれも小さくなることがわかった。

このことから、外気温度などの影響が少ない重量絶対湿度の差が乾燥状態を推定する有望な指標となり得ると考え、乾燥試験時の模擬コンブの含水率と重量絶対湿度差の時間変化との関係を分析した。その一例（試験Ⅱ）を図16に示す。

この図より、全ての模擬コンブの含水率が乾燥完了の目標値である15% d.b.以下となった時の重量絶対湿度差は0.0007 kg/kgであることがわかった。このことから、乾燥終了を判断する指標として、乾燥室入口と出口の重量絶対湿度差が有用であることが示唆された。

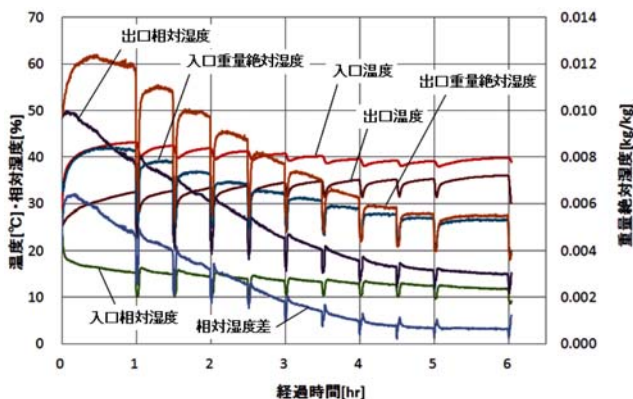


図15 乾燥試験における計測例

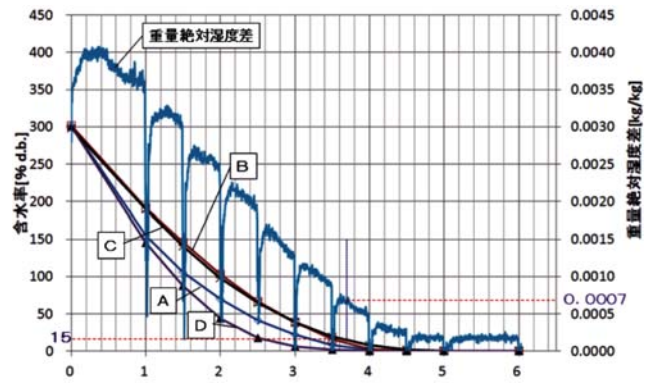


図16 模擬コンブの含水率と重量絶対湿度差

4. 実証試験

モデル試験機の試験で得た基礎技術を活かして乾燥コンブ生産の現場規模を想定した実証試験装置を製作して乾燥機能の確認と乾燥の自動化のための技術開発を行った。

4.1 実証プラントの構築

4.1.1 装置構造

実証試験用に開発したコンブ乾燥システム（実証プラント）の仕様を表3に、構造を図17と図18に、外観を図19に示す。乾燥室の容量は、奥行1.7m×長さ3.6m×高さ2mであり、歯舞で使われている乾燥装置のほぼ1/9の大きさとなっている。

本システムは、ヒートポンプを用いて除湿した乾燥空気を乾燥室内に循環させることにより室内に吊り下げたコンブの乾燥を行う。循環する乾燥空気は、ヒートポンプ内の蒸発器側で除湿と同時に熱が吸収され、その後、凝縮器側で加温されて乾燥室の二重構造部分の空間を通過して天井と側壁の開口部から吹き出し、吊り下げられたコンブの間隙を通過してヒートポンプ側に回収される。本装置内には、温湿度センサや風速センサと乾燥中のコンブの重量を計る荷重センサが組み込まれている（表4）。なお、荷重センサはロードセルであり、図20に示すように、棹毎の荷重を計測するセンサが12個（L1～L12）、棹①～⑧までのユニット1と棹⑨～⑯までのユニット2のそれぞれの総重量を計測するセンサが8個（TL1～TL8）使われている。

また、乾燥室の外周は50mm厚程度の断熱材で断熱されており、内側は防湿フィルムで防湿・気密処理を行っている。コンブを掛ける木の棒は、吸放湿の影響を排除するため、アルミテープで被覆している。

表3 実証プラントの仕様

| | | |
|-----|------------------------|---|
| 乾燥室 | 大きさ | 幅約1.8m×長さ約3.6m×高さ約2.4m(面積13.3m ²) |
| | 棟長さ | 1.5m |
| | 棟数 | 16本 |
| | 棟間隔 | 150mm |
| | 棟密度 | 3.1本/m ² |
| | 投入コンブ許容重量 (一次乾燥コンブ) | 40kg(一次乾燥コンブ重量) |
| | 内壁 | 断熱材+防湿シート |
| 機械室 | 乾燥空気 | 二重構造、天井と側面の2箇所 吸込口:側面2箇所 |
| | 含水率測定 | 棟8本単位の重量計測用ロードセル2組 棟1本単位の重量計測用ロードセル6組 |
| | 大きさ | 幅1.8m×長さ1.8m×高さ約2.6m(面積4.8m ²) |
| | 外気取込口 | 1箇所(切替式) |
| | ヒートポンプ | 三菱電機(株)製 RPH-P5A |
| | 除湿能力 | 14.2 L/h (室内吸込空気乾燥温度25℃、相対湿度80%時) |
| | 使用電力 | 4 kW |
| 電源 | 3相200V、20A | |



図19 実証プラントの外観

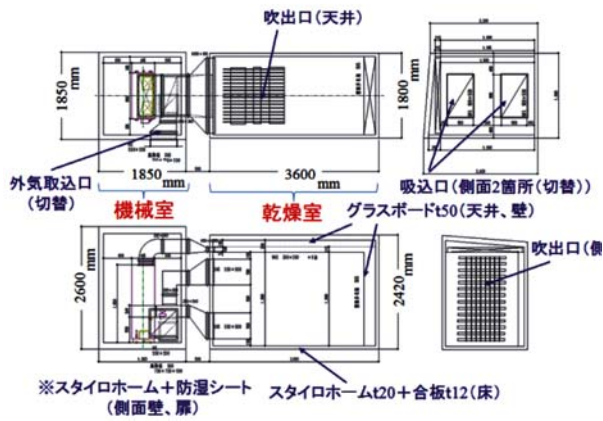


図17 実証プラントの構造 (図面)

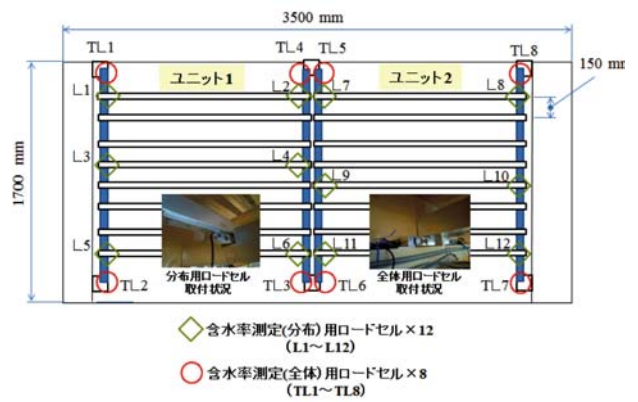


図20 荷重センサの配置

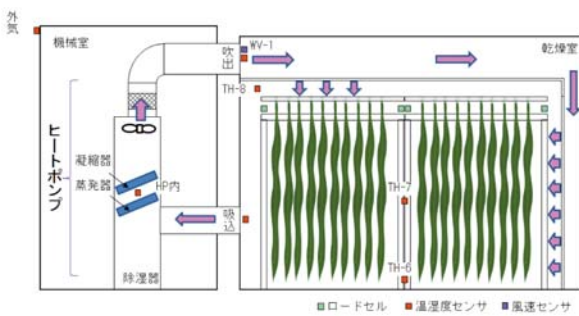


図18 実証プラントの構造 (模式図)

表4 使用センサ

| | |
|-------|---|
| 温度センサ | (株)チノー製 温度計 HN-CFA3 7個 |
| 風速センサ | カノマックス社製 SYSTEM 6243 |
| 重量センサ | (株)エー・アンド・ディ製 LCB03K015M 12個 ロードセル LCB04K060M 6個 |

4.1.2 センシング・制御システム

乾燥システムのモニタリングと制御を行うシステム系の構成を図21に示す。本システムでは、各センサ信号をインタフェースを介してPCに取り込み、市販のソフトウェア (Labview) で構築したアプリケーションでヒートポンプの運転制御と各センサの状態表示を行う (図22)。

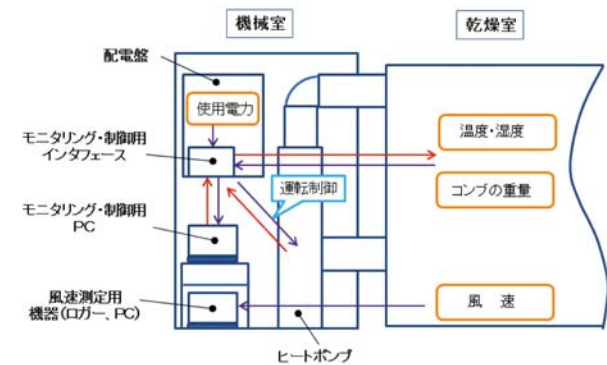


図21 モニタリング・制御システムの構成

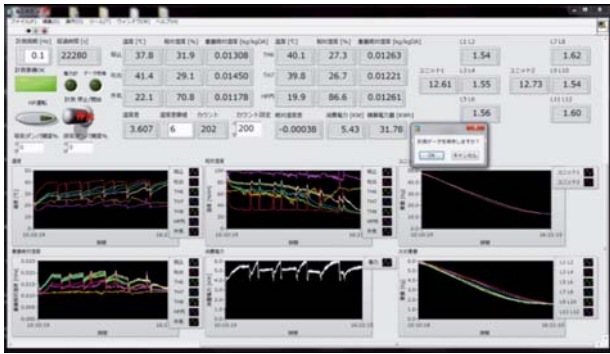


図22 モニタリング・制御システムの画面表示

4.1.3 乾燥の均一化

コンブ乾燥装置においては、乾燥し難い所が乾燥目標の含水率になるまで乾燥が行われるため、乾燥が早く進む所は乾燥終了時点では過乾燥となり品質に影響がでるほか、余分なエネルギーが消費されることとなる。そのため、乾燥室内の乾燥ムラは極力抑える必要がある。そこで、本実証試験では、樹脂製の不織布（PVA）を模擬コンブとして用いて、乾燥のバラツキを抑える方法を検討した（図23）。

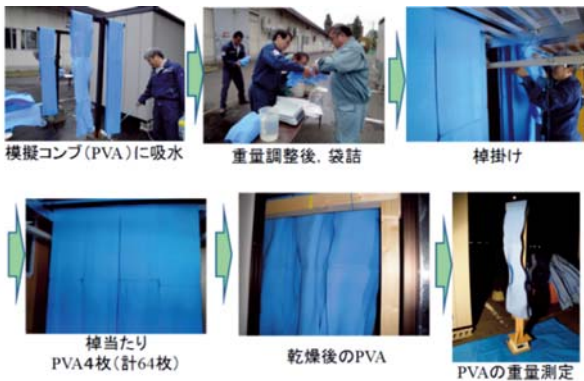


図23 模擬コンブを用いた試験状況

a) 乾燥空気吹出口の開口調整

図24に示す乾燥室内の天井と側壁の2ヶ所の吹き出し口の開口調整を行った。表5に開口の調整条件を、図25に乾燥ムラ解消試験結果（条件①と条件②の乾燥の進行が最も早い棒と最も遅い棒の重量変化）を示す。この図では、表5の条件③とすることで重量変化を示す各線の間隔が狭くなっており、乾燥のバラツキが抑えられることがわかった。

表5 乾燥空気吹出口の開口調整条件

| | 天井吹出の開口 全開時:幅10mm×長さ600mm ×32本 | 壁吹出の開口 全開時:幅20mm×長さ1800mm ×8本 |
|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
| ① | 全塞ぎ | 全開口 |
| ② | 左端開口 | 約45%塞ぎ |
| ③ | 3板称開口 | 約45%塞ぎ |

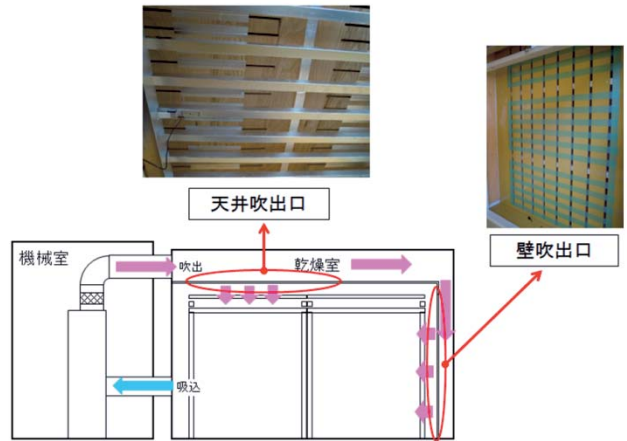
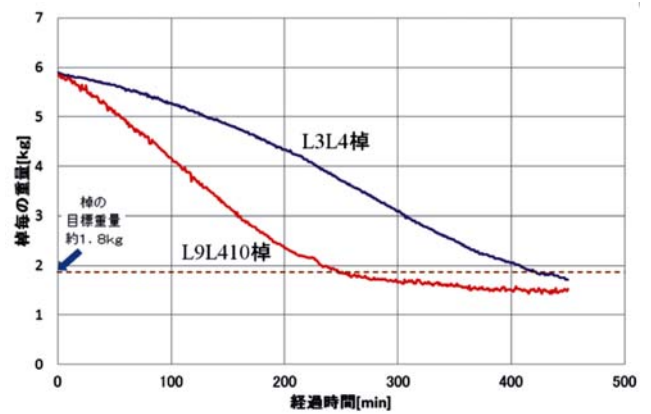
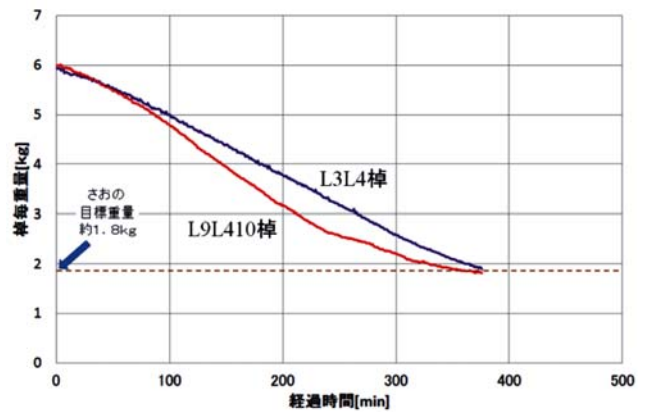


図24 乾燥ムラの解消（吹出口の開口調整）



(a) 条件①



(b) 条件③

図25 乾燥ムラ解消試験結果

b) 攪拌ファンの導入

前述の乾燥空気吹出口を条件③にして乾燥試験を行い、乾燥試験後の64枚の模擬コンブの乾燥のバラツキを調べた所、乾燥ムラが十分解消できていないことがわかり、乾燥が遅れ

る部分を中心にファンによる空気の強制的な攪拌を行った。図26に攪拌ファンとして用いたエアサーキュレーターを、図27に攪拌ファンの設置状況を示す。なお、攪拌ファンは乾燥室中央の乾燥遅れがあった部分に設置した。図28に攪拌用ファンの有無による各模擬コンブの含水率を示す。本試験により入口側右部分（位置名称53, 54, 55, 57, 58, 59, 61, 62, 63）の模擬コンブの乾燥遅れが解消できることがわかった。



図26 攪拌用ファン



図27 攪拌用ファンの設置状況

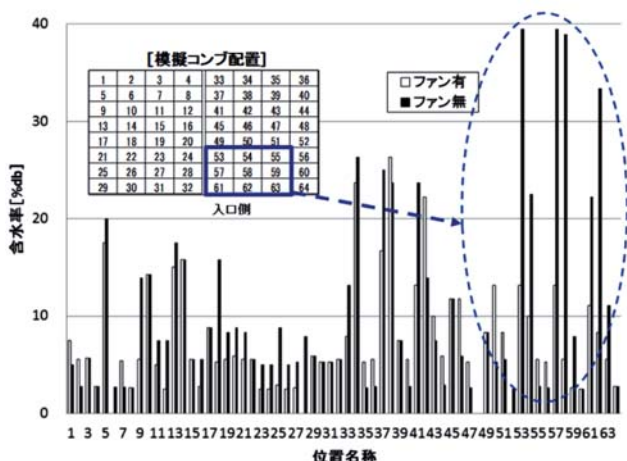


図28 攪拌用ファンの効果

4.1.4 乾燥速度の向上

乾燥速度の向上を目的に乾燥室内に遠赤外線ヒーターを追

加し、効果を確認した。図29に使用した遠赤外線ヒーターの仕様と取付状況を示す。本試験では、500Wのヒーターを8個用い、乾燥開始直後から1時間発熱を継続した。図30にヒーターの有無の効果の確認試験を行った時の乾燥室内の吹出位置の温度と外気温の変化を示す。本試験の結果、ヒーターの追加により循環空気の吹出口で温度上昇が早まる効果はあるものの、目標の含水率に至るまでの乾燥時間には影響がないことがわかった。

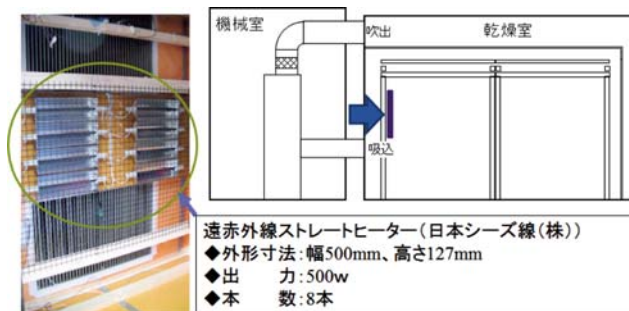


図29 遠赤外線ヒーターの取付状況

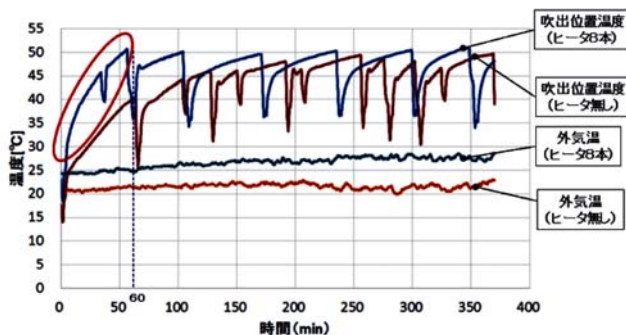


図30 遠赤外線ヒーターの効果



図31 昆布森での実証試験

4.2 乾燥試験

乾燥ムラを極力抑えるように調整した実証プラントを釧路町昆布森に移設し、水揚げされたコンブ（ながこんぶ）の乾燥能力などを確認する乾燥試験を行った（図31）。本試験で

は、図32に示すように、水揚げされたコンブを必要に応じて天日干しし、その後3mの長さ切断し棒に掛けた状態で乾燥室内に吊るし乾燥試験を行った。以下、昆布森で行った試験内容・結果を説明する。

4.2.1 密度試験

棒（棹）にコンブを掛ける際、コンブの間隔を大きく確保することで風まわりが良くなり乾燥速度が速まると考えられる。一方、建屋の建設コストを考慮すると、可能な範囲でコンブの掛け密度を大きくすることも望まれる。掛け密度が大きい場合でも、強制的に気流を与えることで、乾燥速度が向上する可能性もある。そこで、コンブを掛ける棒の間隔、棒に干すコンブの本数、ファンの有無をパラメータとして、乾燥速度を比較する試験を行った³⁾。

図33と図34に密度試験に使用した装置と試験の状況を示す。棒の間隔は3種類で、気流に平行な面は上部を除き対象境界面と考えて風防で囲った。風防の高さは1,000mm、奥行きは508mmである。表6に本試験の条件を示す。実証プラントにおけるコンブの掛け密度と同等の「標準密度」と、そのおよそ2倍の本数のコンブを掛けた「倍密度ファンなし」、さらに倍密度の場合はヒートポンプの吹き出し気流と平行に、乾燥棒の上流側からファンで送風を行った「倍密度ファンあり」の3条件で実験を行った。各条件における含水率の段階ごと（100～500% d. b.）の乾燥速度を示す係数 $f(W_f)$ ³⁾の値を図35に示す（ここで、 W_f はコンブの含水率）。棒間隔120mmで $f(W_f)$ が大きい（乾燥が速い）傾向があるが、120mm間隔の棒を乾燥室中央に配置したことにより除湿機からの吹出し気流の影響を受けやすいことが原因として考えられる。また、倍密度としても、棒間隔120mm以上の条件では、ファンで気流を与えることで標準密度の場合と同等以上の乾燥速度を確保できることがわかった。

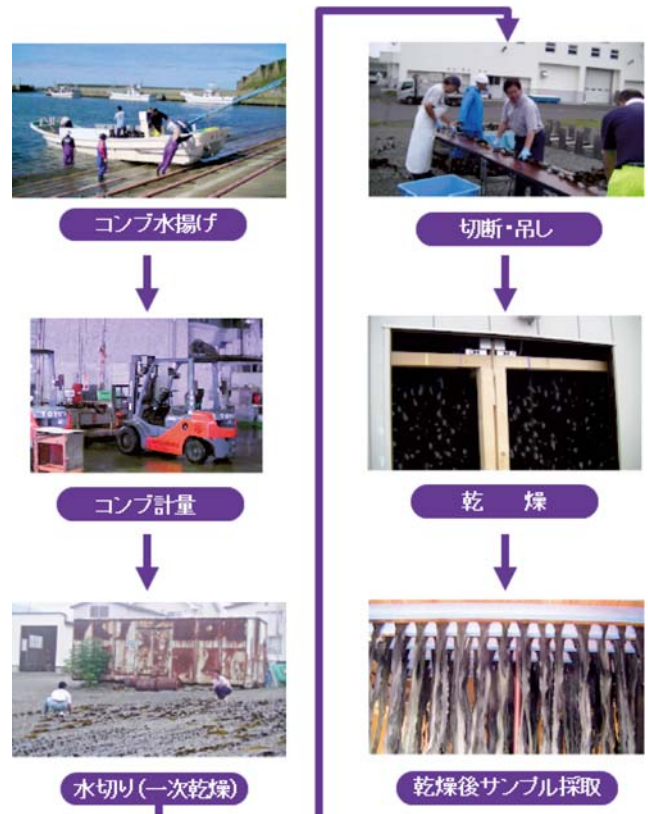


図32 乾燥試験の流れ



従来密度の掛け方 従来密度の2倍の掛け方

図34 密度試験の状況



(棒間隔は左から80mm, 120mm, 160mm)

図33 密度試験用棒

表6 密度試験の条件

| 実験条件 | 棒間隔(芯々) | 実測掛け密度 [kg/m ³] |
|----------|---------|-----------------------------|
| 標準密度 | 80mm間隔 | 3.4 |
| | 120mm間隔 | 2.5 |
| | 160mm間隔 | 2.1 |
| 倍密度ファンなし | 80mm間隔 | 8.1 |
| | 120mm間隔 | 5.4 |
| | 160mm間隔 | 4.5 |
| 倍密度ファンあり | 80mm間隔 | 8.4 |
| | 120mm間隔 | 5.4 |
| | 160mm間隔 | 4.7 |

kg³はコンブの絶対質量

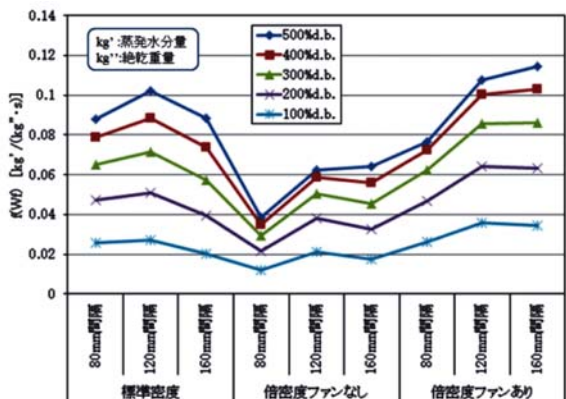


図35 密度試験の結果

4.2.2 乾燥能力試験

本試験では、実証プラントの乾燥能力を検証するため、現場で行われている乾燥方法と同様に一次乾燥したコブと漁獲された直後の生コブの乾燥試験を行った。図36と図37に乾燥試験の結果を示す。

生掛け時のコブの含水率は、完全に乾燥した重量を基準とする含水率で700%、一次乾燥直後のコブの含水率は300%であり、乾燥コブとするため15%まで乾燥する。

本試験の結果、一次乾燥後のコブ乾燥時間は9時間、生コブからの乾燥時間は11時間となり、生コブからの乾燥でも一次乾燥からの乾燥と同質の乾燥コブが得られることがわかった。

4.2.3 外部との空気入替による乾燥速度向上

高温多湿な乾燥室内空気を排出し、低温低湿な外気を導入する方法について、乾燥時間短縮効果を検証した。図38に実証試験装置に追加した空気入替機構を示す。本機構は、ダクト内の開閉を電氣的に制御するものであり、ヒートポンプの排気側と吸気側のそれぞれに取り付けた。生コブを対象として行った試験の結果を図39に示す。

高温多湿な空気の排出によりヒートポンプの運転状態を良好に保つことが可能となったが、乾燥時間短縮への効果は見られなかった。

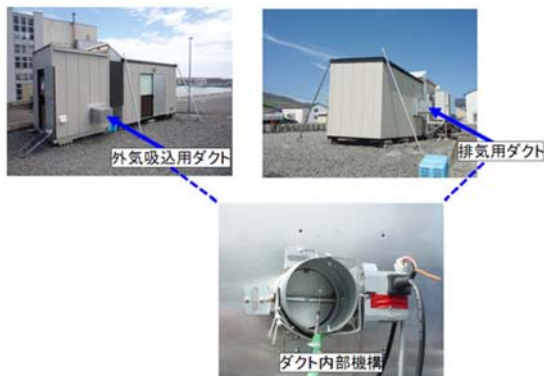


図38 乾燥室空気入替機構

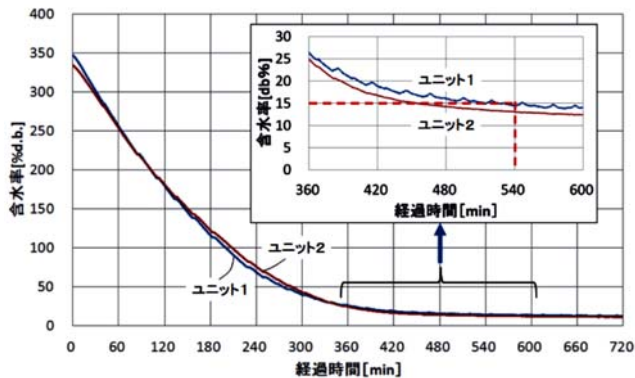


図36 乾燥能力試験（一次乾燥後）

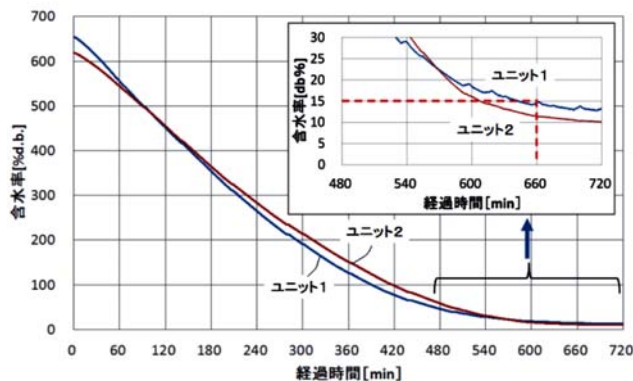


図37 乾燥能力試験（生掛け）

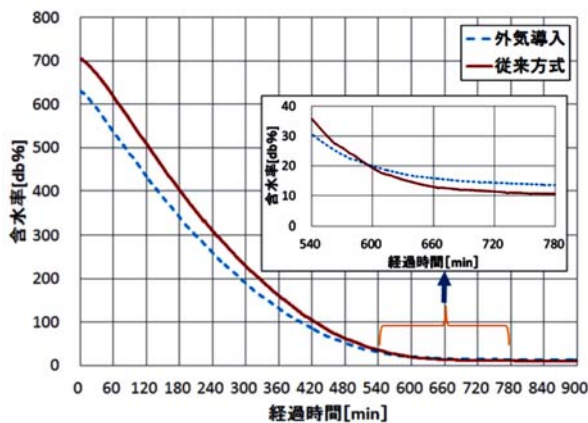


図39 外部との空気入替の効果

4.2.4 自動乾燥制御

本研究では、無駄なエネルギー消費を抑え、乾燥状態の途中点検作業をなくすため、乾燥室内の温度・湿度をモニタリングして乾燥状態を推定し乾燥の自動停止を行う制御技術の確立に取り組み、その最終確認を実証試験で行った。

本試験では、計測の扱いが容易で被乾燥物の乾燥度に強い相関を持つヒートポンプの入口・出口の温度差を新たな指標とし、模擬コブと生コブの乾燥を自動停止することを試

みた。なお、この温度差は、乾燥工程の途中で不定期に発生するヒートポンプの保護機能により大きく変動するため、サンプリング（10秒間隔）に温度差がしきい値を越える回数を積算し、それを乾燥運転の終了の目安とした。試験条件を表7に、被乾燥物を模擬コンブとした場合の乾燥試験の結果を図40に、被乾燥物を生コンブとした場合の乾燥試験の結果を図41に示す。

本試験の結果、模擬コンブと生コンブのどちらの場合も乾燥停止の目安としたカウント値により乾燥を自動停止することが可能であることを確認した。

4.3 モニタリング・制御システムの簡素化

開発技術の現場導入を想定し、モニタリング・制御システムの簡素化の検討を行った。本研究では、プログラムの変更の容易さなどから本システムには当初からPCを用いた。現場での使用を考える場合、操作の単純化や取扱の容易さに加え、コストを考慮する必要があり、本検討では、PCベースのシステムから一般的に製造ラインなどで使われているプログラマブルコントローラ（PLC）を用いたシステムへの置き換えを試みた。図42に簡素化したモニタリング・制御システムの構成を示す。また、PLCに実装したプログラムの画面表示を図43に示す。

本検討により、安価なシステムに置き換えができ、操作性などが向上すると考える。

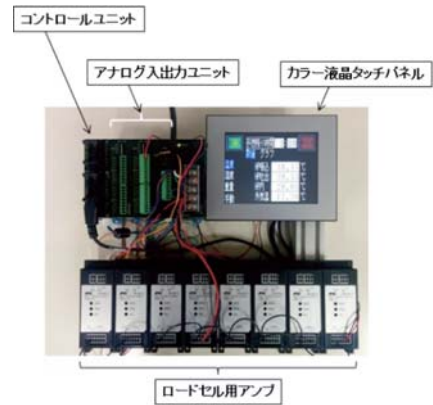


図42 簡素化モニタリング・制御システム

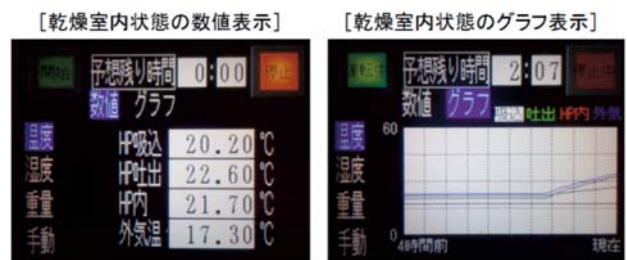


図43 簡素化モニタリング・制御システムの画面表示

表7 自動乾燥試験の設定条件

| | 指標設定値 (ヒートポンプの吹出口と吸込口の温度差[°C]) | カウント設定値 [回] |
|------------|-----------------------------------|-------------|
| 模擬コンブ(PVA) | 6.00 | 200 |
| 生掛け | 1.18 | 200 |

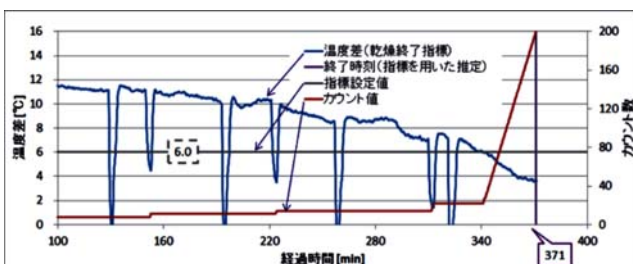


図40 自動乾燥試験結果 (PVA)

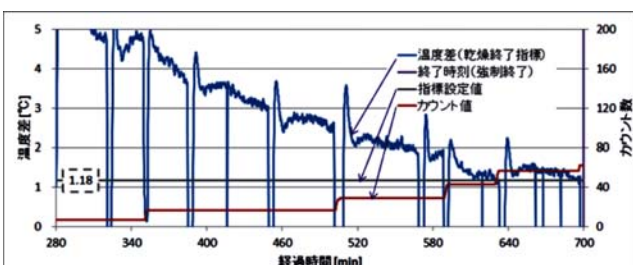


図41 自動乾燥試験結果 (生掛け)

5. 実用スケールシステムの検討

実証プラントは、実態調査を行った「歯舞A」の乾燥施設の1/9スケールである。そのため、省エネや省力化などの効果を把握するためには、実際の乾燥施設の規模にスケールアップする必要がある。ここでは、コンブ漁業就労者の減少、高齢化などコンブ漁業を取り巻く状況を考慮して、複数の漁家で共同利用する「協業化」を想定した実用スケールのシステム検討を行った。

5.1 協業化規模の検討

協業化を検討するにあたり、漁協や漁家に対して協業化の規模、形態、コスト、作業効率などのヒアリング並びに文献調査を行った⁴⁾⁵⁾。図44に共同作業について、図45に共同乾燥センターでの生掛け乾燥についてのアンケート結果を示す。一部の地域に施設の共同利用を強く支持する所が見られるものの、全体的には、肯定的な意見が少数派となっている。また、日高中央漁協やえりも漁協へのヒアリングでは、「乾燥の協業化は、将来的には可能性がある。」「将来の姿として、共同利用設備の使用はあり得る。」「現状でも、3漁家程度の共同施設利用を実施したい組合員がいる。」などの回答が得られた。

協業化への関心度が地域で差があることから、乾燥システムの規模は、3漁家程度の小規模なものにすることとした。

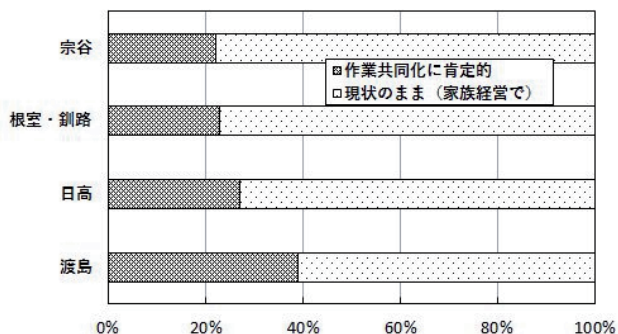


図44 共同作業についてのアンケート結果

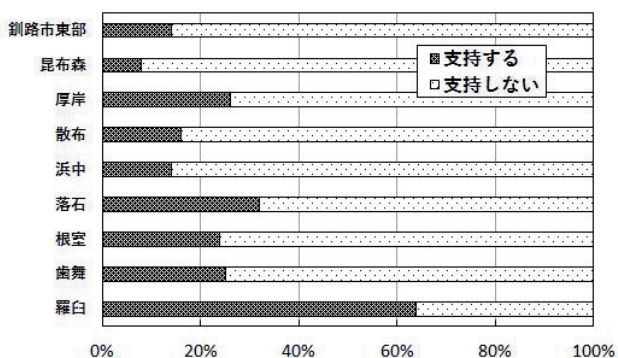


図45 共同乾燥センターでの生掛け乾燥についてのアンケート結果

mで、平面積430 m²となり、従来の乾燥施設の約9倍となる。

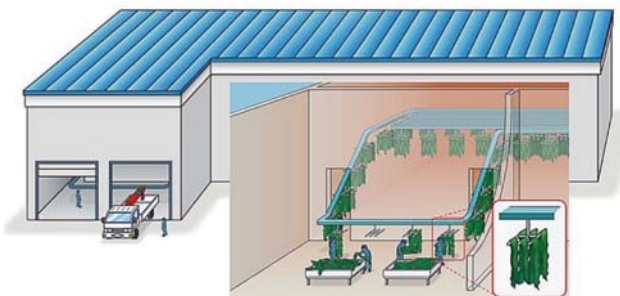


図46 連続式乾燥システムのイメージ図

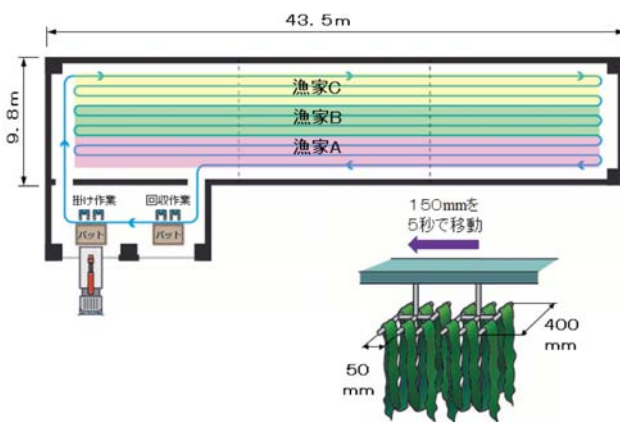


図47 3漁家利用時の乾燥施設と吊り具のイメージ図

5.2 協業化の形態

乾燥システムの協業化を行うに当たり、コンブの取り扱い方法として「連続式」と「バッチ式」の2つの方法について検討した。連続式は、金属製品の塗装ラインで用いられている方式である。また、バッチ式は、木材の乾燥施設で用いられている方式である。

5.2.1 連続式乾燥システム

連続式乾燥システムのイメージ図を図46に示す。投入部と回収部が同じ場所にあり、その2箇所がコンベアで一筆書きのようにつながっている。コンベアに接続されたコンブ吊り具が一定速度で移動するため、作業者は定位置で吊す作業をすることになり、移動による負担が軽減できる。コンベアの長さは、掛け外しの作業速度と乾燥時間により決まるため、従来の乾燥方法と比べて、建物の容積が大きくなる。

具体的に、コンブを収納する乾燥施設の容積について検討を行った。図47に、3漁家利用時の乾燥施設と吊り具のイメージ図を示す。1漁家が1回に採取するコンブの本数は約2000本で、3漁家分で6000本となる。1つの吊り具に2本のコンブを吊して150mmピッチで配置すると、ラインの長さは450mとなる。吊り具が5秒で1ピッチ(150mm)移動すると、1漁家の搬入時間は、1.5時間程度となる。乾燥施設の容積は、コンベアの旋回半径などを考慮すると縦9.8m、横43.5

5.2.2 バッチ式乾燥システム

バッチ式乾燥システムのイメージ図を図48に示す。従来の乾燥施設が複数(イラストでは3漁家)集まった形態である。棹にコンブを掛けて、一定間隔で棹を並べる。乾燥中に棹が移動しないため、連続式と比べると建物の容積が小さい。この方式は、従来の乾燥施設がもともになっているので、縦9.6m、横14mで、平面積135 m²となる。

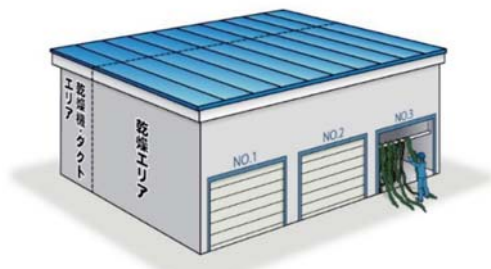


図48 バッチ式乾燥システムのイメージ図

5.2.3 連続式とバッチ式の比較

上記2種類の方法について、「乾燥スペース」、「使い易さ」、「設備コスト」の評価項目ごとに比較を行った。表8に、比

較表を示す。乾燥スペースは、連続式がバッチ式の3倍の面積を必要とする。面積が大きいということは、ヒートポンプの出力が大きくなり、施設の建設費用も大きくなる。連続式では450mのコンベアが必要となり、設備コストも高額となる。以上のことから、乾燥システムでは、バッチ式の形態を検討することにした。

表8 連続式とバッチ式の比較表

| 評価項目 | 連続式 | バッチ式 | 備考 |
|--------|-----|------|--------------------------------------|
| 乾燥スペース | × | ○ | 連続式：430㎡ バッチ式：135㎡ |
| 使い易さ | △ | ○ | 連続式：搬入時、待ち時間発生 バッチ式：同時搬入可能 |
| 設備コスト | × | ○ | 連続式：コンベアシステムが高価 バッチ式：コンベアシステムより安価 |
| 総合評価 | | ○ | |

5.3 作業効率を考慮した乾燥システムの設計

コンブ生産は、その作業のほとんどが労働集約的な作業で、作業者の身体的な負担も大きい。そのため、乾燥システム利用時のコンブの運搬作業に着目して、作業者への負担を軽減して作業効率を向上させる検討を行った。

歯舞Aの施設では、幅4.6m、奥行9.6mの乾燥施設とコンブを堆積した場所を何度も往復している。乾燥施設に設置された棧が奥まで移動すれば、作業者の移動距離が少なく、負担も軽減されると考えられる。図49に、コンブ搬送装置のイメージ図を示す。

乾燥施設入口付近に棧を十数本配置可能な棧が収納され、作業者はその場所でコンブを吊す作業を行う。棧に棧が配置されたら、棧を奥に押し出す。棧には、ローラーが組み込まれており、乾燥施設の壁に設置されたガイドレールを奥まで移動できるようになっている。これにより、従来の半分以下の移動距離となり、大幅な負担軽減と効率向上が期待できる。

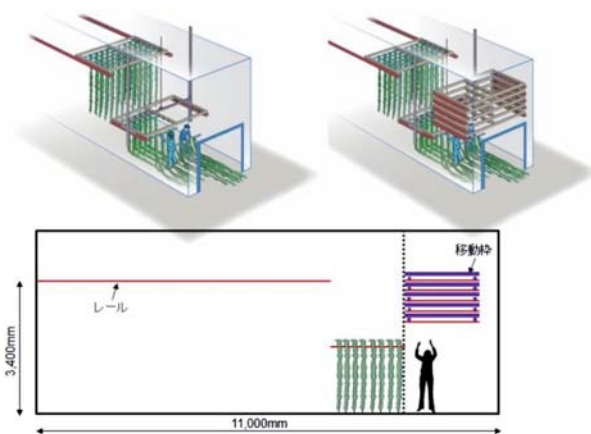


図49 コンブ搬送装置のイメージ図

5.4 実用スケールの省エネ、省コスト効果

以上の検討結果と北方建築総合研究所で行った吸排気や天井扇の配置、乾燥条件のシミュレーション結果を基に、本研究で提案する実用スケールシステムのイメージ図を図50に示す。また、生掛け乾燥と一次乾燥後乾燥（以下水切り後乾燥とする）の場合の計算結果とコスト（燃料代、電気代）を含めた比較を表9に示す。電気代のうち基本料金は年間の使用回数と使用時期により、乾燥1回あたりの額が変わるため、6月～10月の期間に40回使用するとして計算した。なお、計算方法の詳細や仕様選定の根拠については、北方建築総合研究所による別途報告書³⁾を参照されたい。

一次エネルギー（原油換算熱量）の従来型システムに対する実用スケールシステムの削減率は、生掛け乾燥、水切り後乾燥とも59%であった。これは図51に示すように、従来法ではコンブから蒸発した水分を含む高温の空気を排気することで乾燥を進行させるため、捨てられるエネルギーが大きい。一方、ヒートポンプ除湿乾燥では基本的に内気循環で乾燥を行うため、外部に捨てられる熱が少なくなるためである。一方、コスト削減率は生掛け乾燥で34%、水切り後乾燥では運転時間が短くなるため18%となった。ただし、あくまでも現時点の燃料価格や電気料金で算定した結果であり、燃料価格や電気料金は将来変動すると考えられる。参考として、生掛け乾燥の場合についての比較を図52に示す。

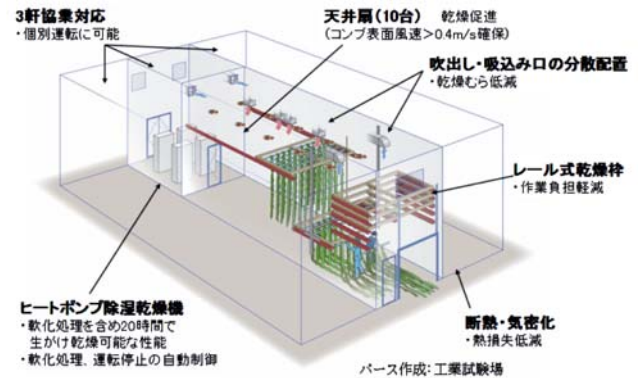


図50 実用スケールシステムのイメージ図

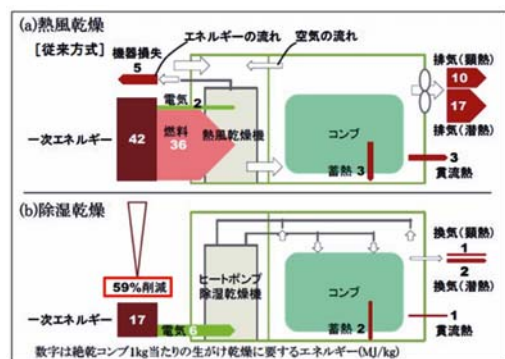


図51 エネルギーの流れの比較

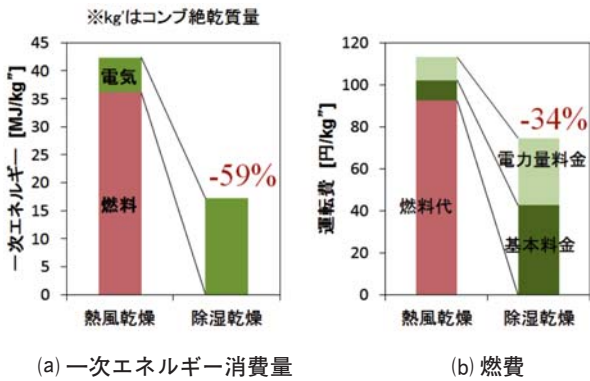


図52 絶乾コンブ 1kg当たりの従来乾燥と除湿乾燥の比較（生掛け）

6. おわりに

本研究では、省エネなコンブ乾燥システムを技術開発し、その技術を基盤として、協業化を想定した大規模なシステムの基本設計を行った。今後は、関係機関と連携し研究成果の展開を行ってきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、北海道水産物検査協会には、乾燥コンブの品質評価について助言をして頂きました、ここに心より感謝申し上げます。

また、根室振興局、釧路総合振興局、根室地区水産技術普及指導所、釧路地区水産技術普及指導所、歯舞漁業協同組合にはコンブ乾燥現場の調査につきましての調整や乾燥コンブ装置開発への助言を頂きました。

また、田尻機械工業㈱には乾燥装置の設計や改造につきまして豊富な経験からの助言を頂きました。

ここに記して感謝申し上げます。

表9 従来型システムと実用スケールシステムのエネルギーコスト比較

| 項目 | 生かけ乾燥（初期含水率700%d.b.） | | 水切り後乾燥（初期含水率400%d.b.） | | 単位 |
|---------------|----------------------|------------|-----------------------|------------|---------|
| | 従来型システム | 実用スケールシステム | 従来型システム | 実用スケールシステム | |
| 最大消費電力 | 23.0 | 79.0 | 23.0 | 79.0 | kW |
| 契約種別 | 低圧電力 | 業務用電力 | 低圧電力 | 業務用電力 | 円/kW・月 |
| 基本料金 | 1,263.6 | 1,836.0 | 1,263.6 | 1,836.0 | 円/kWh |
| 電力量料金 | 17.4 | 18.1 | 17.4 | 18.1 | 円/kWh・月 |
| 力率 | 0.85 | 0.97 | 0.85 | 0.97 | kWh |
| 力率割引後基本料金 | 1,263.6 | 1,615.7 | 1,263.6 | 1,615.7 | 円/年 |
| 消費電力量 | 40 | 1,123.6 | 266.7 | 741.3 | 円/回 |
| 排炭回数 | | 40 | | 40 | 円/回 |
| 使用期間 | 6-10月 | 6-10月 | 6-10月 | 6-10月 | 円/回 |
| 1回あたり基本料金 | 6,176 | 27,123 | 6,176 | 27,123 | 円/回 |
| 電力量料金 | 7,054 | 20,359 | 4,627 | 13,433 | 円/回 |
| 電気料金 | 13,230 | 47,482 | 10,803 | 40,556 | 円/回 |
| A重油消費量 | 23,014 | | 15,172 | | MJ/回 |
| 燃料代（100円/L） | 58,860 | | 38,804 | | 円/回 |
| 乾燥所要時間 | 18:00:00 | 18:01:00 | 11:52:00 | 11:58:00 | |
| 一次E | 26,981 | 10,961 | 17,774 | 7,232 | MJ/回 |
| 絶乾1kgあたり一次E | 42.3 | 17.2 | 27.9 | 11.3 | MJ/kg |
| 絶乾1kgあたり乾燥コスト | 113.1 | 74.5 | 77.8 | 63.6 | 円/kg |
| 一次エネルギー削減率 | | 59% | | 59% | |
| コスト削減率 | | 34% | | 18% | |

引用文献

- 立松宏一・遠藤卓・月舘司・鈴木大隆・福祉暁彦・木村稔・飯田憲一・鶴谷知洋：釧路・根室地域におけるコンブ乾燥施設の温熱環境・エネルギー実測調査，日本建築学会北海道支部研究報告集，Vol. 87，pp. 221-224，（2014）
- 北海道ぎょれん広報なみまるくん，北海道漁業組合連合会，No. 328，（2016）
- 道産コンブの生産安定化に関する研究（建築研究本部北方建築総合研究所実施分），北方建築総合研究所調査報告No. 375，（2017）
- 平成23年度 コンブ漁業就業者の確保・省力化等に関する調査報告書，北海道，（2012）
- 平成25年度 「コンブ作業省力化対策事業」に関する調査報告書，北海道，（2014）