

# 寒冷地における水の相変化を利用した再生可能エネルギーの開発

足立研究室チーム

秋田大学大学院工学資源学研究科機械工学専攻 平澤 貴典

秋田大学工学資源学部機械工学科

遠藤 旬太

## 1. 緒言

私たちの国日本は、自然災害の多い国であり、その被害も深刻なものである。一概に自然災害と耳にすれば、地震、台風、火山の噴火などが注目されがちであるが雪害も大きな自然災害のひとつである。雪害の被害者数は年々増加している傾向にあり、雪害の被害者の多くは屋根雪などの除雪中の転落事故によるものである。また、被害者のほとんどが高齢者であり、年々、豪雪地帯での過疎高齢化社会が進行しているという背景から、今後も雪害の被害は増加していく懸念がある。そこで我々は寒冷地の特性を活かし、雪害を対策する独自のアイデアを用いた装置の開発を検討する。

本研究では、豪雪地帯で再生可能エネルギーとして位置づけされている「冷熱エネルギー」に注目し、冬季の外気をエネルギーとして利用する。すなわち、外気温が1日を通して0[°C]を中心に温度変化する環境と、水が凍結時に体積が1割増加するという現象を利用し、密閉容器内で水が凍結と融解を繰り返すことで発生する圧力をエネルギーとして取り出すという独自のアイデアを用いる。実際に、秋田県の2月の平均最高気温は2[°C]程度、平均最低気温は-2[°C]程度と0[°C]をまたいで気温が変化している。

## 2. 実験の原理, 目的

### 2.1 実験原理

本実験では水が凍結する際に、体積が1割増加するという現象を用いる。例として、密閉された容積1.3[L]の容器内に、1.0[L]の水と0.3[L]の空気を封入する。この容器が冷却され、水が凍結したとき、氷の体積は1.1[L]となり空気の体積は0.2[L]となる。このとき圧縮された空気の圧力は、温度が273[K]で一定で気体定数を8.31[J/Kgmol]、空気を理想気体と仮定すれば気体の状態方程式から $P=nRT/V$ より $P=151.9[\text{Pa}]$ と求めることができる。また、本研究で提唱するシステムを用いた場合に、水の凍結を利用した空気圧縮による1回分のエネルギーは相変化前の空気の体積を $V_1$ 、相変化後の空気の体積を $V_2$ とすると、 $W = \int_{V_2}^{V_1} PdV = \int_{V_2}^{V_1} nRT/V dV[\text{J}]$ となる。上述の条件で考えると、 $W=15.19[\text{J}]$ となる。これは1[kg]の氷の融解潜熱が336[kJ]であることを考えると、1回の相変化か

ら得られるエネルギーは非常に小さいことがわかる。そのため、1 回だけの相変化からエネルギーを得るのではなく、何回も繰り返し相変化させ、密閉容器とは別の蓄圧タンクに空気を溜めることで、より大きなエネルギーとして利用する。

## 2.2 実験の目的

本実験の目的は、水の相変化を用いて冷熱エネルギーを再生可能エネルギーとして利用することにある。利用例としては最近の融雪技術である、屋根と積雪の間に噴流を発生させ降雪を促す滑雪技術や屋根自体が発熱することで融雪を促すルーフヒーティングシステムが挙げられる。水の相変化により得られたエネルギーがこれらの技術に応用できる可能性についての検討を行う。

## 2.3 実験の条件

本実験は寒冷地特有の  $0[^\circ\text{C}]$  をまたいで温度変化するという環境に基づいて行う。ここで、本実験では最高気温を  $5[^\circ\text{C}]$ 、最低気温を  $-5[^\circ\text{C}]$  という条件を模擬的に再現する。

## 3. 実験装置

本研究では、単一容器に水と空気を封入して凍結時の圧力を計測する第 1 の実験と、水と空気を封入した容器とは別に蓄圧タンクを用いて複数の容器を用いた蓄圧に関する第 2 の実験および蓄圧の様子を風船を用いて明らかにする可視化実験の 3 通りを行う。以下にそれぞれの実験の詳細を示す。

第 1 の実験として、密閉容器内の水が 1 回の相変化で発生する圧力を計測する実験に用いる実験装置の概略図を図 1 に示す。図 1 の tank 1 でクーラーによって冷却された不凍液がポンプにより tank 2 に巻かれているホース内を循環する。tank 2 に巻かれたホースがクーラーの役割を果たし、tank 2 内の不凍液を冷却する。tank 2 の不凍液内に水と空気が封入されている test section が冷却され、密閉容器内の水が凍結する。水が凍結することにより体積が 1 割増加して、水の体積増加分だけ空気が圧縮される。その際の圧力を圧力計と密閉容器を接続することで測定する。なお、本実験に用いる圧力計はゲージ圧計を用いる。圧力計、温度計は mbed を介して PC に接続されており、tank 1 の不凍液の温度制御を行い、圧力は PC に出力される。なお、温度制御を行う方法として冷却用の不凍液を循環させるポンプのスイッチとヒーターの電源を ON/OFF で制御する。図 2 は本実験に用いる mbed、図 3 は本実験に用いる体積 1.3[L] のステンレス製の密閉容器である。

次に、第2の実験として密閉容器内の水が相変化を繰り返し蓄圧タンクに貯まる圧力の測定に用いる実験装置の概略図を図4に示す。第2の実験では密閉容器内の水が相変化した際に圧縮された空気の圧力を測定すると同時に、圧縮された空気を高圧タンクへ逆止弁Bを通して送り込む。tank2内の不凍液は、 $5[^\circ\text{C}] \sim -5[^\circ\text{C}]$ の範囲で温度制御を周期的に行うことにより、水が凍結と融解を繰り返す。そのため、test sectionが冷却され、水が凍結し圧縮された空気が逆止弁Bを通過して蓄圧タンクに蓄圧される。一方、ヒーターが作動すると、氷が融解して体積が減少するので、密閉容器内の空気が不足する。その時は逆止弁Aを通過して大気から空気が供給される。そのため、蓄圧タンクに次第に高圧の空気が溜まるというシステムとなっている。図5は、本実験に用いる tank1 と tank2 の写真である。

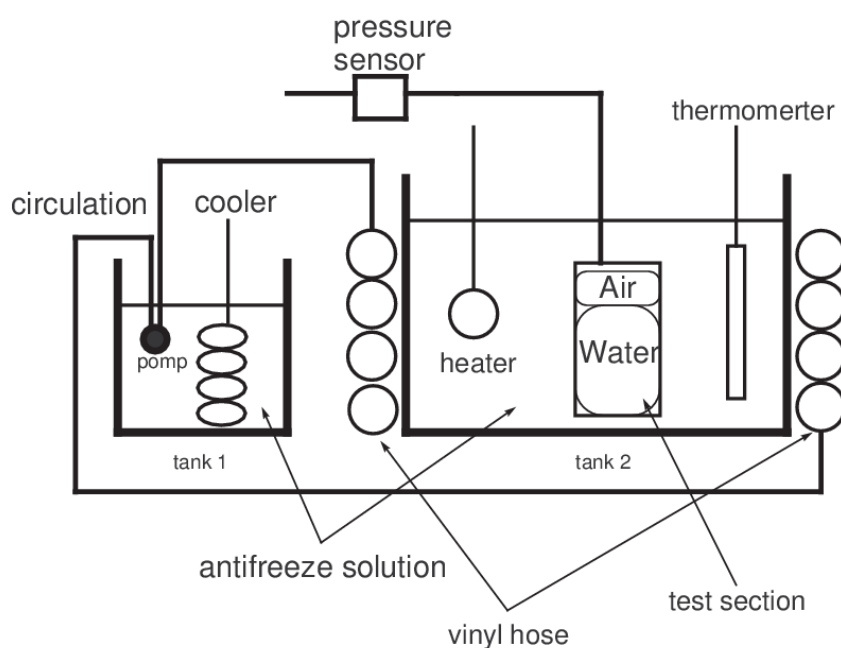


図1：第1の実験に用いた実験装置

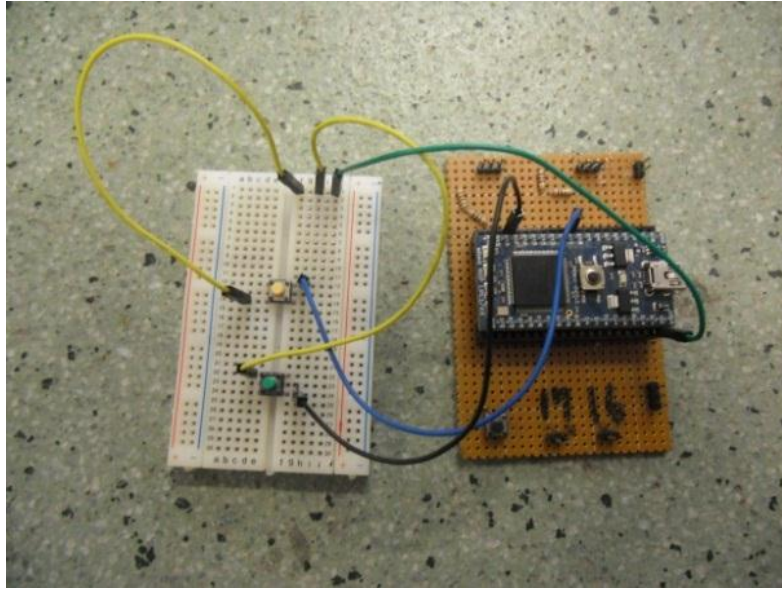


図 2 : 温度制御を行う mbed



図 3 : 体積 1.3[L]のステンレス製の密閉容器

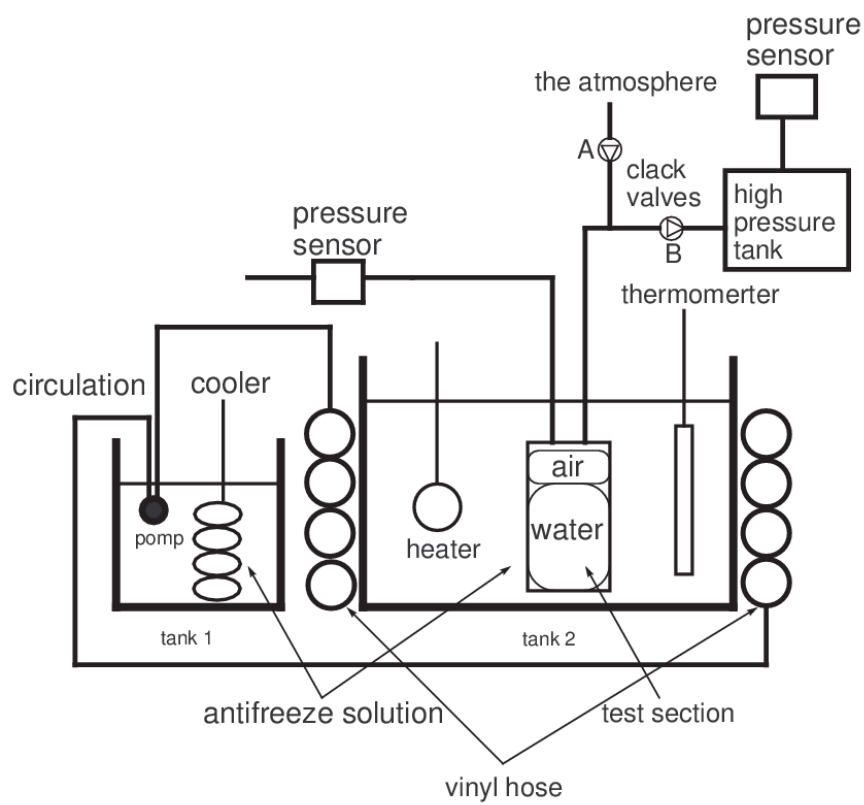


図 4 : 第 2 の実験に用いた実験装置

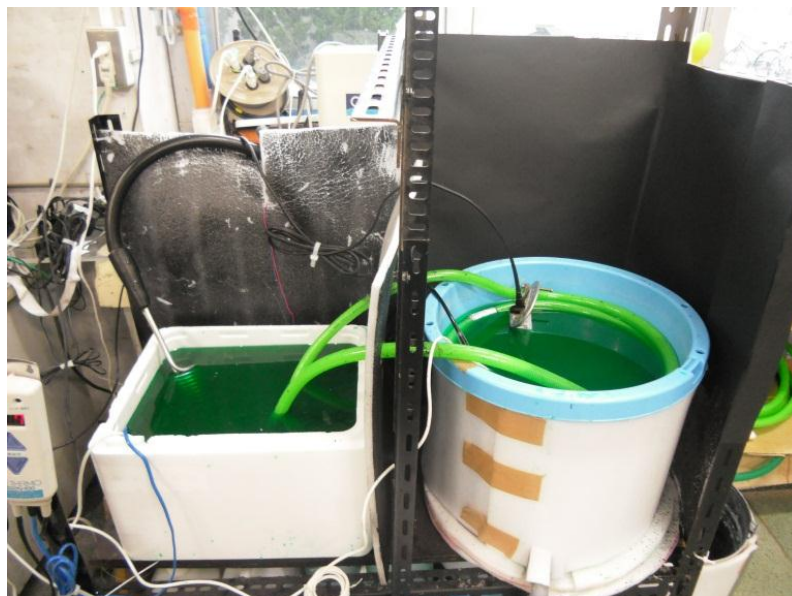


図 5 : 実際の実験装置の写真

#### 4. 結果

##### 4.1 第1の実験について

第1の実験として、密閉容器内に水と空気を封入させ、密閉容器を冷却し、水が相変化した際の圧力の測定実験を行う。体積1.3[L]の密閉容器に1.0[L]の水と0.3[L]の空気を封入した際に発生する圧力のグラフを図6に示す。

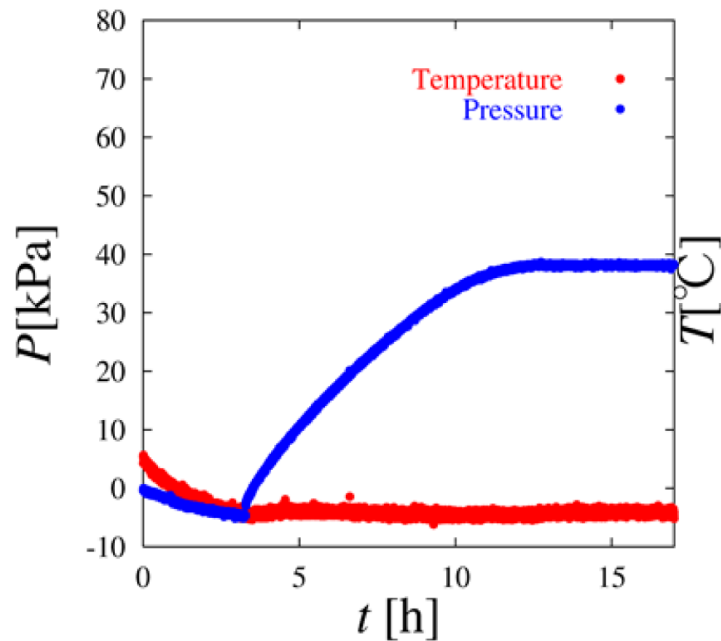


図6：密閉容器に1[L]の水を封入し相変化させた際の圧力のグラフ

tank 2は5[°C]から-5[°C]の範囲で温度制御を行っているため、初期状態が5[°C]となり、十分に時間が経過した後、-5[°C]となっている。一方、容器内の初期状態の圧力はゲージ圧で表しているため0[kPa]となっている。ゲージ圧とは、計測された圧力から大気圧分を引いたものであり、初期状態の容器内の空気は大気圧と等しいため0[kPa]となっている。

図6より実験開始から約4時間後に水が凍結し空気が圧縮されたため、圧力が増大することがわかる。実験開始から約11時間後以降は圧力が約39[kPa]で定常的な値となっており、全ての水が凍結していると考えられる。次に、同じ密閉容器内の水の体積を変え、同様の方法で実験を行い、全ての水が凍結し圧力が定常値となったときの圧力を密閉容器内の水の体積に対して示したグラフを図7に示す。

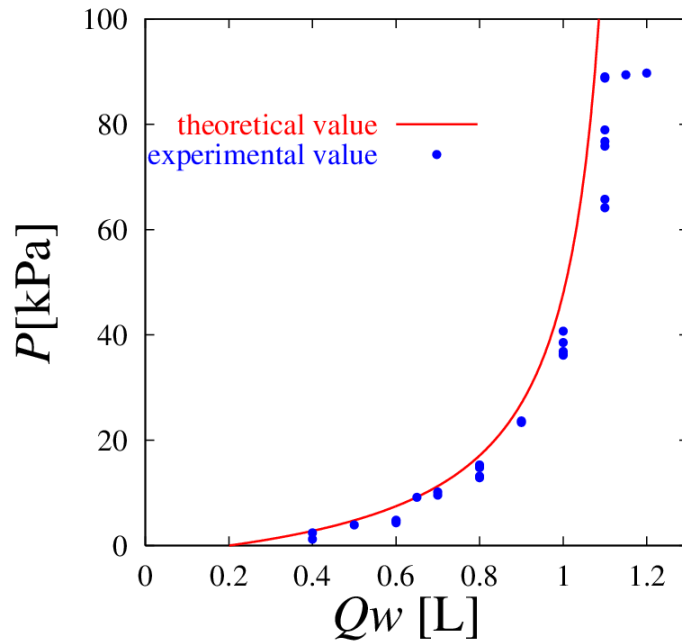


図 7：理想気体の状態方程式から求めた圧力と，実験から得た圧力の比較

図 7 の実線で示されている理論値は，理想気体の状態方程式  $P=nRT/V$  より求めた圧力  $P$  のゲージ圧である．容器内の水の体積が小さいときは，実験値が理論値に近い値をとっているが，容器内の水の体積が大きくなると，徐々に理論値と差が出てくることが分かる．一見，気体の状態方程式  $P=nRT/V$  より，密閉容器内に含まれる空気の体積  $V$  が小さくなるほど水の凍結による空気圧縮の影響が大きくなるので，空気の体積が 0 に近づくと空気の圧力は  $\infty$  になるように見える．しかし，実際には密閉容器内で発生した圧力が水にもかかることにより水の凍結が抑制されるため，圧力が  $\infty$  になることはないと考えられる．グラフからも，1.1[L]以降では発生する圧力が同程度であるため，水の一部の凍結が抑制されていることが考えられる．ただし，1.3[L]の密閉容器を用いた場合に，水の凍結により 90[kPa]程度までの圧縮圧を利用できる可能性があることがわかる．

#### 4.2 第 2 の実験について

第 2 の実験では，図 4 の tank2 内を 5[°C]から-5[°C]の範囲で周期的に温度変化を行った．tank 2 の温度が下がると密閉容器内の水が凍結して圧力が上昇し，tank 2 の温度が上がると密閉容器内の氷が融解して容器内の圧力が下がる．しかし，図 4 の逆止弁 B により蓄圧タンク内の圧力は下がらない．そのような仕組みを利用して密閉容器内の水が凍結し圧力が発生する際に，連続的に蓄圧タンクに空気を溜める実験を行う．図 8 に，

tank2 の温度を周期的に変動させた場合の密閉容器および蓄圧タンク内の圧力の時間変化を示す。図 8 の Pressure1 は密閉容器内の圧力、Pressure2 は蓄圧タンク内の圧力を表す。密閉容器内の水が凍結すると密閉容器、蓄圧タンク、どちらも圧力が増大する。蓄圧タンクの圧力は相変化を繰り返すことで徐々に増大する。また、温度が上昇し、氷が融解すると容器内の空気の不足分が、図 4 の逆止弁 A から供給されるため、容器内の圧力 Pressure1 が初期状態の 0[kPa]に戻る。また、密閉容器内の水が凍結しているときの Pressure1 と Pressure2 は同じ値になっている。このふるまいは、圧力は容器内で均等になる性質があるためである。この実験の条件で水 1.0[L]が入っていると考えると、図 7 より容器内の圧力は最大で 40[kPa]程度となる。そのため、40[kPa]程度まで蓄圧タンクに蓄圧が可能と考えられる。

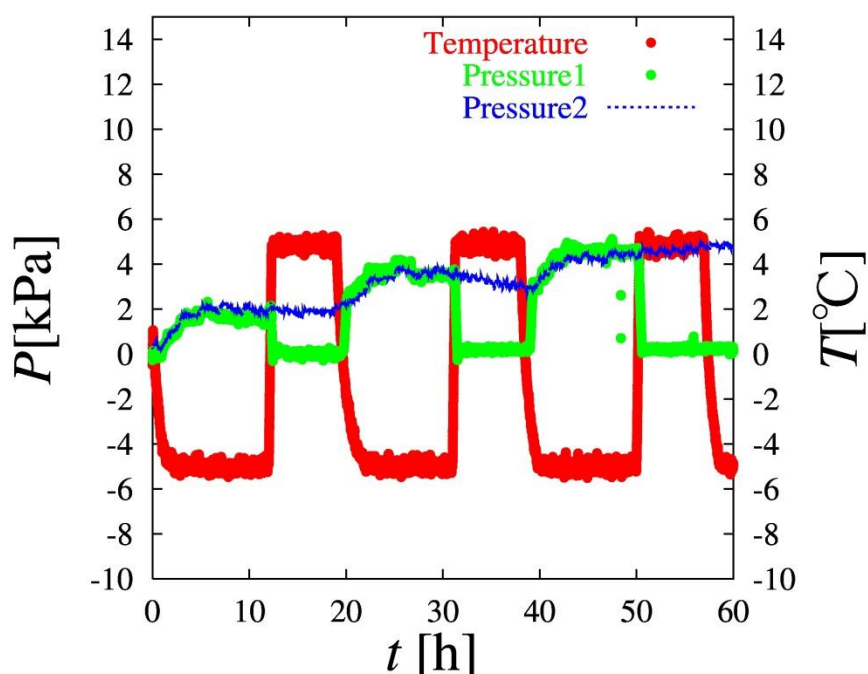


図 8：密閉容器内の水を連続的に相変化させたときの密閉容器内と蓄圧タンク内の圧力

#### 4.3 密閉容器内で圧縮される空気と蓄圧の可視化

密閉容器内の水が相変化をするときに圧縮された空気が蓄圧タンクに蓄圧される様子を可視化する。アクリル製の密閉容器に水と空気を封入し、この密閉容器に風船を接続することで本実験の可視化を行う。アクリルはステンレスに比べて熱伝導率が非常に低く、ステンレスの容器を用いたときに比べて容器内の水を相変化させるのに要する時間が長くなると考えられる。そこで時間短縮をするため、温度制御の幅を設けずに急冷と急温を繰り返して実験を行う。

図 9(a)に初期状態を示す。このアクリル容器を冷却することで、図 9(b)のように容器



内の水が凍結し、容器内の水面が上昇する。水面が上昇したことにより、圧縮された空気が風船に送られ、風船が膨らむことがわかる。円筒容器がポンプの働きをすることで風船に空気が送り込まれ、蓄圧が可能となる

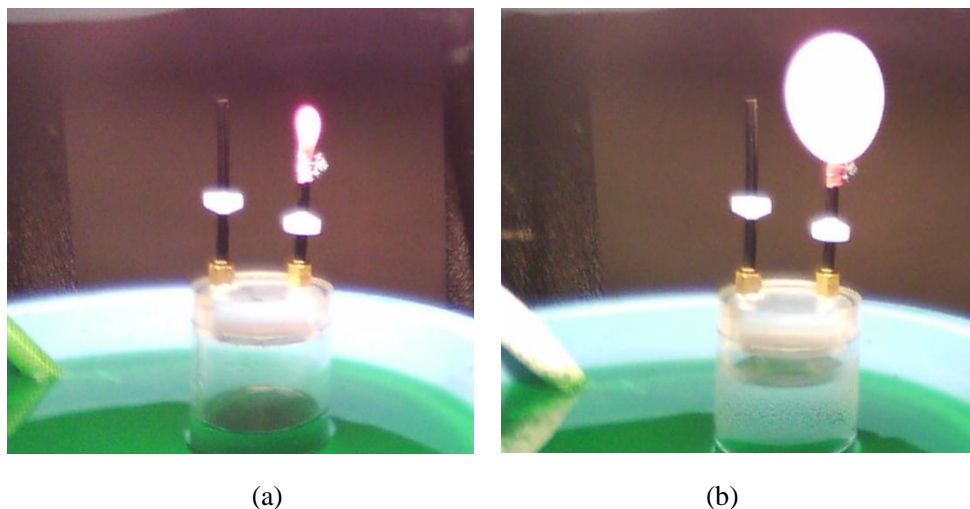


図9：空気の動きの可視化実験の様子

#### 4.4 本研究の応用について

冒頭でも述べたように、本実験のシステムで、容器内に1[L]程度の水を入れ、1回だけ相変化させた時に得ることができるエネルギーが約15[J]でありとても小さいことが分かる。そのため、1000倍の1000[L]の水が相変化をするものと仮定すると15[kJ]のエネルギーを得ることができる。この容器を設置するには1[m]×1[m]×1[m]のスペースが必要である。しかしこの容器は、一般家庭の浴槽程度の大きさであるため現実的な大きさといえる。本システムは、1日に1回相変化をするものとしているので、30日間蓄圧すると約450[kJ]のエネルギーを得ることができる。しかし、1[m<sup>3</sup>]の水を外気により1日で完全に凍結させるのは非常に困難である。そのため、完全な凍結が実現しない場合には、図10に示すように水が入っている密閉容器を小さくし、複数個用いることで伝熱面積を大きくし凍結を促進する設計が望ましい。

一般的な融雪技術のひとつであるルーフヒーティングにおける消費電力は、1×2[m<sup>2</sup>]の面積につき約220[W]であり、10分稼働した場合には約130[kJ]の動力を必要とする。もうひとつの滑雪技術では、屋根の10~63[cm]の積雪の処理に対して630[W]の送風機を3分間使用することで積雪の処理が完了するという報告がある。この場合、3分間送風機を使用した場合、約110[kJ]の動力を必要とする。1ヶ月蓄圧した空気をこれらの技術に応用することで2~3回使用することが可能となる。しかし、本研究のシステムがメインとなりこれらの融雪技術に応用することは容易ではないため、節電のための補助的な役目や、緊急用のエネルギー源として利用することが望ましい。

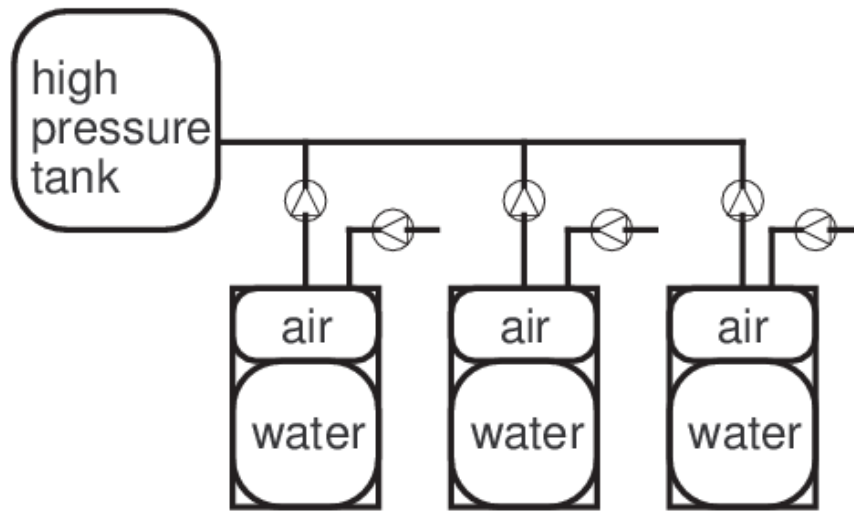


図 10：複数個の密閉容器を用いた設計

## 5. 結言

本研究では、水の相変化を利用した蓄圧システムの開発に関する実験を行った。本実験により得られた結果の概要を以下に示す。

- ・水が相変化をする際に発生する圧力は、理想気体の状態方程式より求めた理論値に近い値となった。しかし、容器内の水が凍結する際に水の体積が多い程、圧縮される空気の圧力が大きくなり水の凍結が抑制されるため、発生する圧力は $\infty$ になることはない。

- ・相変化を繰り返し行うことで蓄圧を行う実験では、相変化の度に蓄圧が可能であることが分かった。密閉容器内で発生する圧力が大きくなれば、より大きなエネルギーを得ることができる。

- ・1回の水の相変化より得られるエネルギーは小さいことが分かり、これらを繰り返し蓄圧することで、最新の融雪技術に応用することができる可能性を示した。

## 6. 謝辞

本研究は, 株式会社八光電機様からの助成をしていただきました. 上原明様をはじめ, 本研究を八光熱の実験コンテストのテーマに選定していただきました社員の皆様に感謝の意を表し謝辞とさせていただきます.

また, 日々研究にアドバイスをしていただいた秋田大学の足立高弘准教授に深く感謝いたします. そして, 日々, 研究に協力してくれた足立研究室の皆様にも深く感謝いたします.