

CO₂発生に伴う地球温暖化に関連して、発電設備における化石燃料使用量の抑制や電力負荷平準化の推進など、社会的対応が強く求められている。当社は対応策の一つに氷蓄熱を取り上げ、夜間電力を氷の形で高密度に貯蔵する不凍液直接接触式氷蓄熱システムの開発に取り組んでいる。安全な非水溶性不凍液と水との直接接触により製氷を行うもので、製造される氷はシャーベット状であるため解氷性に優れている。

この技術は電力負荷の平準化に貢献し、夜間電力の主構成電源である原子力発電の活用を促し、化石燃料の節約およびCO₂発生の抑制に寄与することができる。

With the threat of global warming due to the emission of gases such as carbon dioxide (CO₂), there is a strong need for the reduction of fossil fuel consumption by power plants and the leveling of daytime and nighttime electric power demand.

Toshiba has recognized that the ice storage system is one of the countermeasures for dealing with these issues, and has been developing a unique ice storage system utilizing an antifreeze direct contact method where surplus nighttime electric power can be converted to ice and stored efficiently. Since the ice has a rapid melting speed due to its sherbet state, it can be easily applied to cooling systems for multipurpose use.

This technology contributes not only to the leveling of electric power demand, but also to the reduction of fossil fuel consumption and CO₂ emissions by utilizing nuclear power at night.

1 まえがき

CO₂を主因とする地球温暖化問題が顕在化し、発電設備における高効率化など、化石燃料使用量の抑制や、拡大するいっぽうの昼夜間の電力需要の格差を解消するための電力負荷平準化の推進など社会全体での取組みが必要になってきている。CO₂発生の抑制、電力負荷平準化に貢献する方策の一つに夜間余剰電力を氷の形で貯蔵する氷蓄熱が注目され、電力会社も蓄熱調整契約による夜間割引、メーカーへの奨励金など、各種インセンティブを与えて普及に努めている。

当社は施策の一環として、大規模建屋空調用およびガスタービンなどの大型吸気冷却用を目標に、安全な非水溶性不凍液と水との直接接触により製氷を行うユニークな不凍液直接接触式氷蓄熱システムの開発に取り組んでいる。

ここでは、この方式の特長、開発現況、電力負荷平準化および環境調和への寄与度などについて述べる。

2 製氷方式の特徴

製氷方式は、スタティック方式とダイナミック方式に大別され、それぞれ次のように分類される。いずれも大規模氷蓄熱システムとしては数例の実証研究が報告されている程度であり、実用化に向けた研究開発が行われている現状

である。

(1) スタティック方式

(固い氷を静的に製造する)

アイスオンコイル
潜熱蓄熱材方式

(2) ダイナミック方式

(動的に氷を製造する)

流動過冷却方式
不凍液直接接触方式

アイスオンコイル方式は、ビル空調などの小型のユニットタイプにおいて実績も豊富であるが、大規模システムにおいては適用例が少ない。また、着氷した氷は固体のため高速解氷性などの負荷追従性が良くないなどの傾向にある。

潜熱蓄熱材方式(カプセルタイプ)は、高密度の蓄熱が可能であるが、アイスオンコイルと同様に負荷追従性が良くない傾向にある。

流動過冷却方式は、水の過冷却現象を利用した方式であり、生成された氷はシャーベット状の氷であるため、高速解氷に適している。追加製氷、直接取水などで優れているが、物理特性上不安定な温度流域(0°C〜-2°C)で製氷を行うため水の子熱や、十分な水質管理が必要となる。

不凍液直接接触方式は、低温の不凍液を水中に直接噴き出し、水との直接接触熱交換により、微細な氷片を析出し、貯氷することで冷熱を貯めるものである。

表 1. 不凍液直接接触式氷蓄熱の各方式と検証状況

Types of antifreeze direct contact ice storage method and status of verification

	水平噴出し方式	流路反転方式	氷移送方式
貯氷原理	・水の浮力利用	・氷の浮力利用 ・水流による圧縮効果利用	・氷の浮力利用 ・水流落下による圧縮効果利用
原理図			
特徴	・高速解氷性 ・システムがきわめてシンプル ・製氷筒が不要。 ・スペースファクタを改善	・高IPF ・高速解氷性 ・製氷筒要 ・水の再循環ライン要	・高IPF ・高速解氷性 ・製氷筒要 ・移送装置要
検証槽	矩(く)形水槽 (W2m×L2.4m×H3m) 貯水量 12m ³	縦型丸型槽 (D1.5m×H7.5m) 貯水量 10m ³	縦型矩形水槽 (W1.25m×L5m×H10m) 貯水量 40m ³
到達 IPF	10%	30%～35%(最高値)	35%～40%(最高値)
用途	・既設水蓄熱槽の水蓄熱改造	・大型熱供給プラント ・大型建物空調 ・大型工場空調	・ガスタービン吸気冷却用 ・大型工場空調

当社の氷蓄熱装置の基本原理を表1の水平噴出し方式の図に示す。冷凍機から導かれた-6～-8°C程度の非水溶高比重不凍液(比重1.8程度)を蓄熱槽内の水にノズルを介して噴出させることにより製氷は進行する。槽内で0°Cの水は不凍液との直接接触で過冷却となった後に、流れの中の渦などにより過冷却が解除され氷結晶を析出する。このとき、氷結晶は直径数mmの円盤形状のシャーベット状であり、成長と結合を行いつつ蓄熱槽の上部へ浮力により移動し、貯氷される。不凍液は蓄熱槽下部の回収部から回収され、ポンプで冷凍機へ導かれ冷却、循環を継続する。

このシステムの特長は次のとおりである。

- (1) 高効率製氷 直接接触であるため不凍液と水との冷熱交換率は100%近い。
- (2) 解氷性に優れたシャーベット状氷 氷は解氷性に優れ、短時間解氷やどんな負荷要求にも対応できる。また、槽形状には拘束されない。
- (3) シンプルな構成 特別な熱交換器などが不要で機器構成がシンプルであり、保守が容易である。補機が少ないため、システム成績係数が高い。
- (4) 追加製氷や冷・温水製造も可能 残氷状態から随時の追加製氷に対応できる。また、同じ槽を使ってヒートポンプにより冷水や温水を蓄熱することもできる。

3 開発の現況と適用分野

不凍液直接接触方式の氷蓄熱システムに関しては表1に示す3種類の方式について開発を行ってきている。一番目は基本方式ともいえるもので、水槽内に不凍液噴出ノズルだけを設置する水平噴出し方式、二番目は貯氷部と製氷筒を分離する流路反転方式、最後は製造された氷を水流とともに移送し蓄熱槽の上部から落下させる氷移送方式である。

- (1) 水平噴出し方式⁽¹⁾ この方式は、氷の浮力による製氷時の圧縮効果だけを利用して貯氷し、しかも不凍液の直接接触には、槽下部にある程度の熱交換高さを必要とするので氷充填(てん)率(IPF:槽内水に対する貯氷割合を重量比率で示す)は10%前後にすぎないが、システム構成はもともと簡便である。現状のビルなどで利用される水蓄熱による冷熱供給量に比べて3～4倍の冷熱供給が可能である。大型化に伴う課題は残されているが、用途としてはスペース制約の厳しい既設の水蓄熱槽の氷蓄熱槽への改造が考えられる。ちなみに東京電力(株)管内における既設の水蓄熱槽は1,200件、計80万m³あるといわれている。
- (2) 流路反転方式⁽¹⁾ この方式は、高IPF化、蓄熱槽のコンパクト化のニーズに対応したものである。蓄熱槽底部まで貯氷でき、氷の浮力による圧縮効果のほ

かに、製造された氷を水流により圧縮し、IPFの向上を図っている。30%以上のIPFが検証できており、用途としては大型の熱供給プラント、建物空調、工場空調が考えられる。蓄熱槽は独立の縦型槽の場合は鋼板製か、または建物のコンクリート壁を活用したコンクリート(く)体となる。さらに蓄熱槽として建物の地下スラブを利用する場合は、製氷筒を独立設置型として、製造された氷を水とともに搬送する氷水搬送によりスラブ内に貯氷することもできる。

- (3) 氷移送方式 この方式は、蓄熱槽内の氷の浮力と、蓄熱槽の上部から水流で移送される氷の落下圧縮との相乗効果によりIPFのさらなる向上を図ったものである。35%以上のIPFが検証できており、用途としては発電所用などの大型のガスタービン吸気冷却や工場空調などが考えられる。氷移送方式の検証槽を図1に、ガスタービン吸気冷却に用いるときの基本構成を図2に示す。

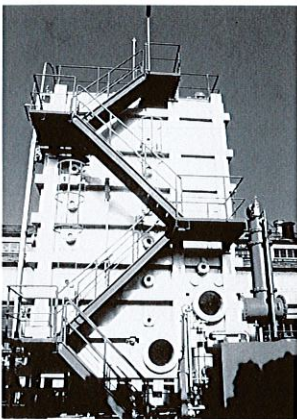


図1. 氷移送方式検証槽 右端の製氷筒内で直接接触により製氷が行われ、槽本体右側の製氷槽で貯氷後、移送装置を介して左側の蓄熱槽に落下移送され、最終的に貯氷される。

Overview of ice transfer type ice storage testing tank

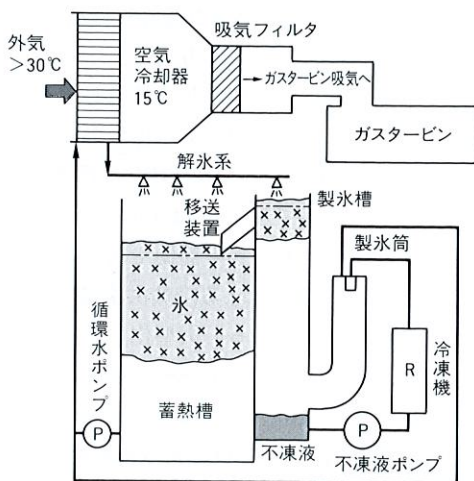


図2. ガスタービン吸気冷却システムの基本構成 夜間に貯められた氷は昼間に解氷されて冷水となってガスタービン吸気の冷却に使われる。冷却後の冷水は昇温し解氷に使われる。

Configuration of gas turbine inlet air cooling system

4 氷蓄熱システムの評価

4.1 電力負荷平準化と設備のコンパクト化

氷蓄熱システムの採用により、ピークシフト(昼間の空調用電力量を極力抑えて蓄熱槽から冷熱を供給し夜間は余剰電力を活用して蓄熱を行う)ができるので電力負荷平準化を達成できる。

熱源機器である冷凍機は昼夜間にわたり平準化された負荷運転を行えばよいので、機器容量が削減でき利用面でのメリットがでる。不凍液直接接触式氷蓄熱システムを用いた延べ床面積10万 m^2 、蓄熱槽容積1,000 m^3 クラスの大型建物空調の試算⁽²⁾では所定の夏季ピーク冷房負荷に対して、非蓄熱に比べ冷凍機容量および昼間の消費電力は50%近くまで削減できる結果となった。さらに氷蓄熱システムとの対比では蓄熱槽容積は1/6以下で済み、槽容積のコンパクト化による省スペースが果たせ、利用面でのメリットがでる。試算における日負荷パターンを図3に示す。

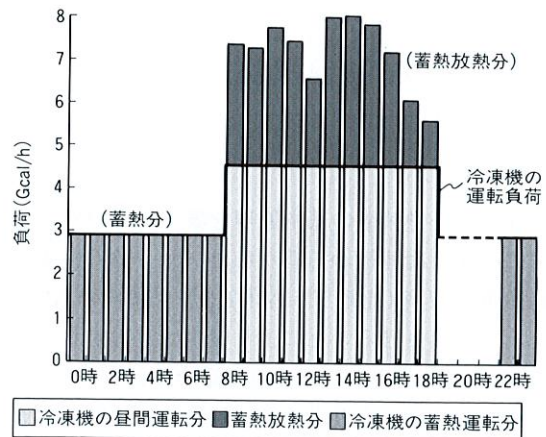


図3. 夏季ピーク時の冷房負荷パターン 夜間の氷蓄熱分はピークシフトとして昼間の蓄熱放熱による冷水供給に使われ、昼夜を通して冷凍機の負荷低減が果たせる。

Thermal load pattern of peak demand in summer

図の例では、4月から11月までの冷熱供給で年間蓄熱量は3,600 Gcalであり、年間ピークシフト量は昼間の冷凍機成績係数(COP: 冷凍機入力に対する熱出力の割合)を4.5と仮定すると930 MWh程度となる。

電力会社との蓄熱調整契約により22~8時の夜間電気料金引き制度を活用すれば運転費用面での経済的メリットがでてくる。大型建物空調における前述試算では、この氷蓄熱システムは非蓄熱に比べ冷凍機コストは割安になるが、蓄熱槽の追加のため全体コストは若干増すものの、契約電力料金の低減と夜間電気料金の活用により年間運転費は削減され、単純回収年数は5年以内となった。

4.2 ガスタービンの出力増大

ガスタービンは、電力需要が増加する夏季の高気温時に機器特性から出力が低下するという宿命にある。それを解消してピーク負荷対策と電力負荷平準化に対応するため、夜間電力を活用して製氷・貯氷を行い、昼間に解氷しながらガスタービン入口部の空気冷却器に冷水を供給して吸気を冷却するものである。ガスタービン機種にもよるが、夏季の30°Cの高気温においても15°C程度までの吸気冷却により10~30%前後まで、コンバインド発電出力は増大する。

4.3 解氷性能

蓄熱槽周りの諸元は次のように表せる。

$$\text{冷熱供給量} = \text{槽容積} \times \text{蓄熱効率} \times (IPF \times \alpha + \beta)$$

ここで、蓄熱効率は解氷性能の指標、 α は水の潜熱、 β は温度定数

α 、 β は定数として与えられるので、ある時間内に要求される所定の冷熱供給量に対して IPF は高ければ高いほど、また全蓄熱量に対して、ある時間内に取り出せる冷熱割合を示す蓄熱効率は良好であればあるほど、槽容積は小さくて済む。

不凍液直接接触方式での IPF は30~35%であり、蓄熱効率は10h程度の取出し時間で80%、2~3h程度のガスタービン吸気冷却などの冷却に求められる高速解氷、短時間取出しでもシャーベット状水であるため70%程度は達成できる。一方、コイルなどの周囲に固い氷を製造する方式は、 IPF は40~50%程度と良好であるが、蓄熱効率は10h取出しで50~60%程度、2~3hの取出しで30~35%程度と低いため、槽容積は不凍液直接接触方式に比べて10h取出しの場合で同程度か30%程度、短時間取出しでは60~100%程度大型化する。氷蓄熱においては IPF だけでなく蓄熱効率で表される解氷性能の評価も重要である。

5 環境調和への寄与

夜間の電力は、ベース負荷である大容量高効率火力発電設備および原子力発電設備により賄われる。一方、昼間は中小火力に変動分を負担させるミドル負荷運用がなされている。氷蓄熱システムによるピークシフトは、昼間の比較的効率の低いミドル負荷運用の火力発電設備から夜間の高効率火力または原子力発電設備への電力負担の移行とみなすことができるので、化石燃料の使用量の抑制すなわち省資源と、CO₂発生量の抑制に寄与すると考えられる。

単純化のために、夜間電力は原子力発電設備により、また昼間の電力は重油焚(た)き火力発電設備により賄われるとすると、図3に示す建物空調の例では年間ピークシフト量は約930MWhであるため、重油焚き火力の熱効率：38

%、燃料発熱量：10,200 kcal/kg およびCO₂発生量：0.23 kg・C/kWh とすれば、年間の重油節約量は約210m³、年間のCO₂発生抑制量は220t程度となる。

なお、不凍液直接接触式氷蓄熱システムに使う不凍液⁽³⁾は、化学的に完全フッ素化されたフッ化炭素(パーフルオロカーボン)で、無色透明、無臭、不燃の液体である。水素原子や塩素原子を含まないためオゾン層を破壊することなく、毒性、皮膚刺激性の点からも安全である。

6 あとがき

当社は、CO₂発生量の抑制、電力負荷平準化への対応策の一つに氷蓄熱システムを位置付けて、大規模システムの実用化を目指し、不凍液直接接触式氷蓄熱システムを開発中であり、今後とも早期実用化を目指し、開発を加速していく所存である。

なお、当社ではこの方式とは別に、中小ビル向けマルチエアコン用に小型の流動過冷却式氷蓄熱システムを研究開発中であり、氷蓄熱のメニューをそろえつつある。

謝辞

特に大型の建物空調向けのシステム開発での共同研究で、ご指導いただいた東京電力(株)営業開発部の関係各位に厚く感謝するしだいである。

文献

- (1) 山下勝也，他：不凍液直接接触型氷蓄熱システムの開発第3報，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.513-516 (1995)
- (2) 高柳幹男，他：不凍液直接接触式氷蓄熱システムの開発現況と実用化，エネルギー・資源学会第14回研究発表会講演論文集，pp.139-144 (1994)
- (3) 橋口真仁，他：不凍液直接接触型氷蓄熱システムの開発第1報，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.505-508 (1995)



高柳 幹男 Mikio Takayanagi

火力事業部火力プラント技術部課長。
熱利用システムおよび新エネルギーシステムの開発に従事。
火力原子力発電技術協会会員。
Thermal Power Plant Div.



武智 英典 Eisuke Takechi

京浜事業所技術・情報システム部部长。
電力機器周辺設備の開発設計に従事。日本機械学会会員。
Keihin Product Operations



渡辺 裕 Yutaka Watanabe, D.Eng.

火力事業部火力プラント技術部主幹，工博。
重電機器および熱利用技術の開発に従事。日本機械学会，
日本伝熱学会会員。
Thermal Power Plant Div.