

昭和基地での生活水の確保

石沢賢二^{1*}・林原勝美²

Water supply at Syowa Station, Antarctica

Kenji Ishizawa^{1*} and Katsumi Hayashibara²

(2014年7月29日受付；2014年12月22日受理)

Abstract: The Japanese Antarctic Research Expedition (JARE) has sourced domestic water for daily use from ponds, snow drifts, and icebergs on sea ice at Syowa Station since the first wintering expedition. These water sources are dependent on weather conditions and maintenance of the sources requires considerable human effort and thermal energy. For example, the maintenance of outside water tanks and pipelines requires a lot of working force of wintering members and huge thermal energy which has been obtained from waste heat of engine generators.

Here, we propose seawater desalination method using a reverse osmosis membrane to provide a reliable domestic water source to Syowa Station. Such a system could meet the station's water needs without requiring a large amount of staff time or heat energy.

要旨: 日本南極地域観測隊は、第1次越冬隊以来、昭和基地周辺の湖水やスノウドリフトおよび海氷上の氷山を利用して生活水を確保してきた。これらの水源は気候条件などに左右されるとともに、その確保には多くの労働力と熱エネルギーを必要とした。また、造水熱源としては、エンジン発電機の廃熱を効率よく利用してきたが、屋外貯水槽や屋外配管の維持には多大な熱量を必要とした。

造水に関するこれまでの問題点を整理することにより、将来の造水法として、逆浸透膜を使った海水の淡水化法を提案する。これにより、少ないエネルギーで安定した生活水の確保が可能になると考えられる。

1. はじめに

昭和基地は海に囲まれた東オンゲル島にある。周囲の海は、通常夏でも厚い氷に覆われているため、氷に穴を開けて汲み出さなければ海水は得られない。一方、硬い岩盤上に立地する基地周辺には、雪解け水が溜まった湖があちこちにある。夏期の数カ月はその水を直接利用できるが、冬期には凍結するため、加熱・融解する必要がある。1957年の第1次越冬隊

¹ 情報・システム研究機構国立極地研究所。National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

² LIN エンジニアリング。LIN Engineering, 535-6 Otsu-ku Tenma, Himeji, Hyogo 671-1143.

* Corresponding author. E-mail: ishizawa@nipr.ac.jp

以来、日本南極地域観測隊は夏期には湖水を利用し、冬期はポンプとホース、あるいは給水車などを使って生活水を基地の水槽まで輸送した。また、海氷上にある氷山の一部をチェーンソーやツルハシで切り崩し、雪上車と橇で基地に運んだり、建物周辺の積雪を使って、生活水を確保した。

第1-6次隊までは合計4回越冬したが、越冬隊員は最大でも16名だったので、消費量も比較的少なかった。しかし、南極観測船「ふじ」が就航し、基地が再開した第7次隊以降は、隊員数が徐々に増えたため、大きな造水槽を屋外に設置して生活水を確保する必要がある。この造水作業は越冬中の大きな負担であり、試行錯誤を繰り返しながらその方法を徐々に確立していった。

基地で生活するためには、電力、暖房、食糧それに生活水が不可欠である。電力や暖房の確保は、燃料があれば比較的容易に実現可能だが、水に関しては、水源、造水熱源、降水量などにより大きな制約を受けるため、越冬生活にとって大きな課題であった。

ここでは、これまで昭和基地で行われてきた生活水の確保方法をレビューし、将来の効率的な造水方法を提言する。

2. 生活水の使用量

南極観測船「宗谷」で人員・物資輸送を行った第1-6次隊までの間、第2次および第6次隊を除いて合計4回越冬したが、越冬報告書に水使用量の記載はない。また、造水に苦労したという記録が残っていない。図1に第7-54次隊までの生活水の使用量を示す。これは各隊の越冬報告書（日本学術会議南極特別委員会（1958, 1960-1962）、南極地域観測統合推進本部（1967-1973）、国立極地研究所（1974-2014））の表やグラフから読み取ったものである。南極観測船「ふじ」が就航し南極観測が再開した第7次隊では18人が越冬し、日平均約800lで年間292klを消費した。1人1日当たり約44lである。第8-24次隊までは年間消費量が約500klで推移した。南極観測船「しらせ」が就航した第25次隊からは、屋外に100klと130klの水槽ができ200kVA発電機のコジェネレーションシステム（電熱併給装置）が稼働したため、年間消費量が一気に増加し約900klとなった。その後、徐々に増加し、第53次隊では1854klとなっている。消費量は、基地に滞在した人数のほかに、そのときの積雪量や湖の水量などの自然現象、造水方法や配管設備、さらには隊の節水の方針などが影響しており複雑である。第25次隊から飲料水は脱塩装置を通して給水するようになったが、トイレ洗浄水や洗濯水などは、この装置を通さない中水として、第33次隊から本格的利用が始まった。この使用量の推移を図2に示す。現在は年間約600klの使用量となっている。第53次隊を例にとると、中水も含めた年間使用量は、2539klとなり、1人1日当たり232lで、日本の生活用水の平均使用量である約300l（国土交通省水管理・国土保全局水資源部、2014）に迫る量となっている。この量は第7次隊の約5倍である。

第43次隊の使用量が飛び抜けて多いのは、次の理由が考えられる。第43次隊の夏期作業として、基地側水槽から荒金ダムまでの循環水回路を断熱配管に更新した。また、越冬中にダムの給水ポンプを大型の物に取り替えた。その結果、多くの熱量によりダムの融水が進み水位が上がった。そこで観測隊は、洗濯などで積極的に中水使用を行った。しかし、結局ダムの堤防は決壊し、第44次隊の夏に修復した。

3. 水 源

3.1. 概要

南極に新たな基地をつくる場合、立地条件として第一に考慮すべきことの 하나가、生活水の得やすさである。昭和基地でこれまで利用されてきた水源としては、積雪、湖水、氷山水、海水上のパドル水の4種類である。昭和基地は東オングル島の露岩地帯に立地し、所々に小さな湖があり夏期には比較的容易に生活水を確保できる。図3の水色の部分が夏期に現れる湖水である。湖水は、夏期の限られた期間だけ使える。おおむね4月以降になると気温が下がり凍結するため、人工的な熱源を加えなければ凍結する。積雪は気候条件により、安定的に使えるときとそうでないときがある。氷山は通例、昭和基地周辺の海水上に点在しているので、海水厚が十分に雪上車の走行が可能なきは使用できる。しかし、人力での砕氷と橇での運搬に労力が必要で、越冬隊員にとって大きな負担となる。越冬初期の夏期には、日射

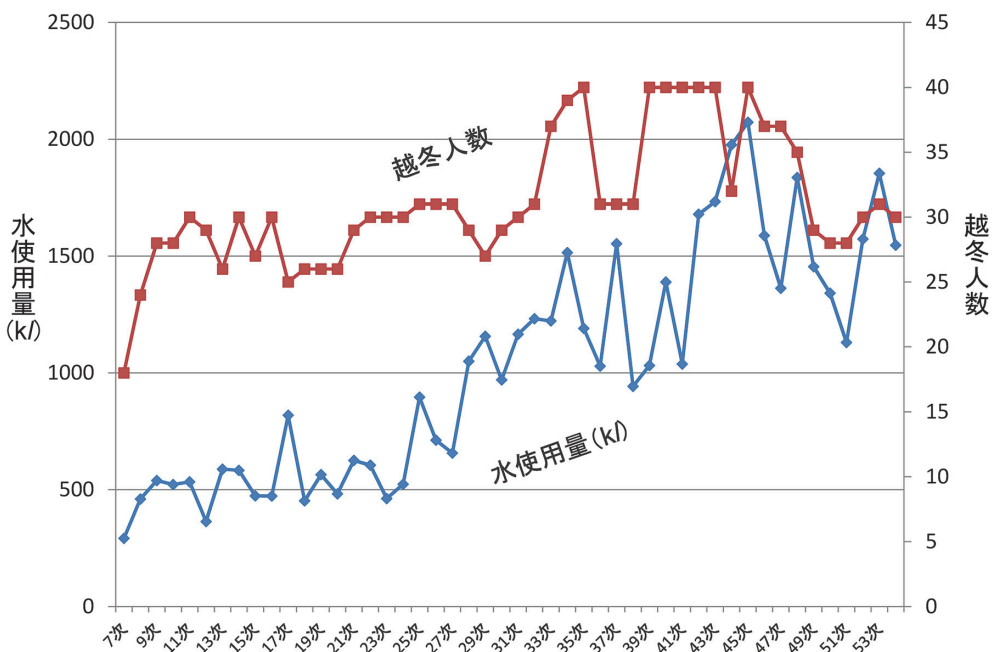


図 1 越冬中の水使用量 (第7-54次隊)

Fig. 1. Water consumption by the 7th to 54th JARE wintering parties.

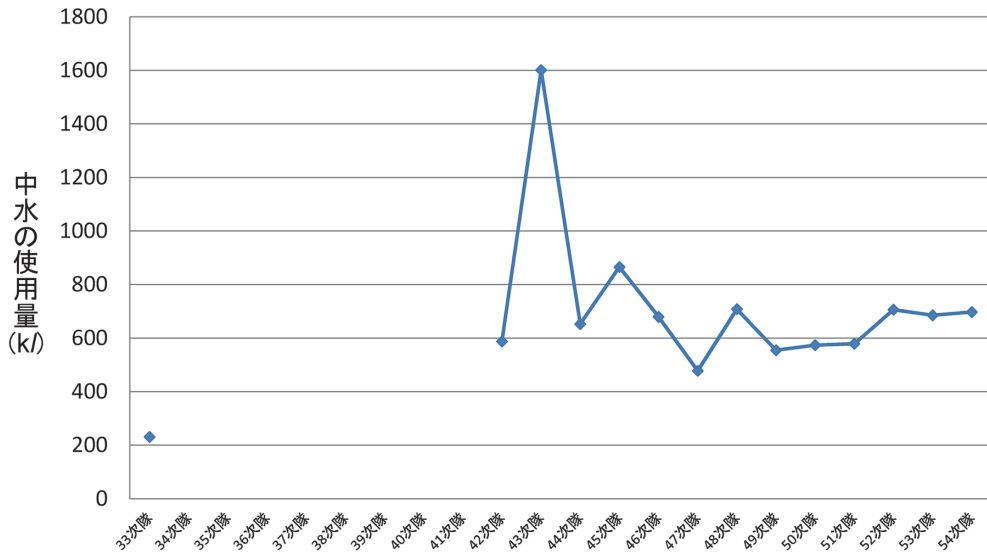


図 2 越冬中の中水の使用量 (第 33, 42-54 次隊)

Fig. 2. Consumption of non-desalinated water by the 33rd, and 42nd to 54th JARE wintering parties.

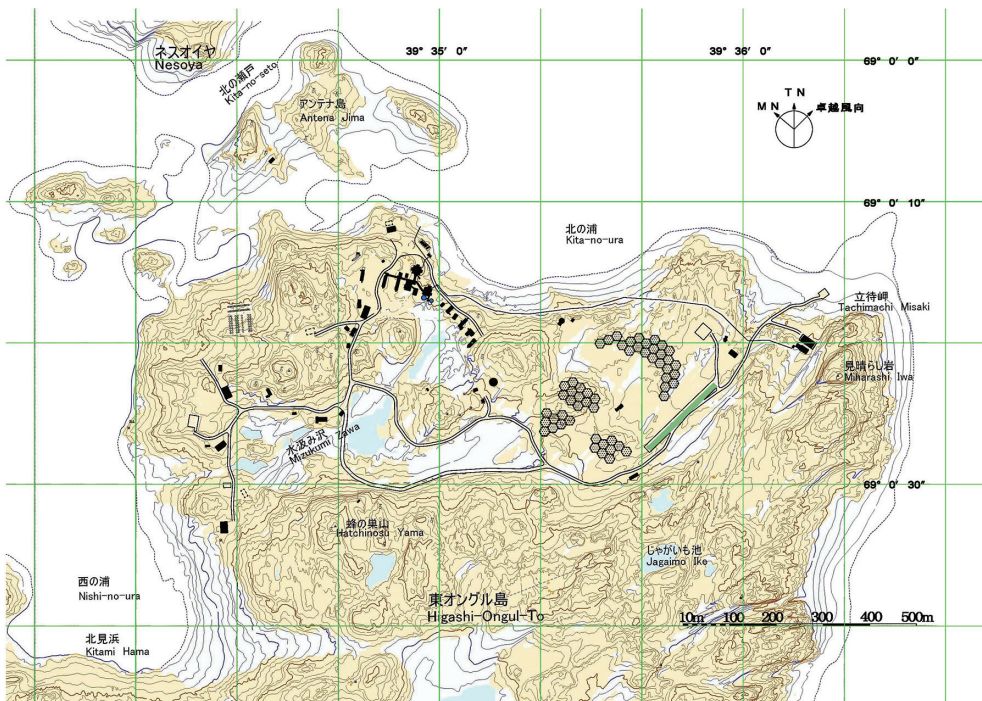


図 3 昭和基地付近の夏の湖水

Fig. 3. Water lakes near Syowa Station in summer.

の影響で海氷上にできたパドル（雪や海水が融解した水たまり）も雑用水として利用できる。固体の水（氷）から液体への融解潜熱は、334 kJ/kg と大きいので、いずれの水源でも冬期には多量の熱エネルギーが必要となる。付録 1 に観測隊報告書から抜粋した水源、造水熱源、貯水槽設備に関する事項をまとめた。

3.2. 湖水の利用

第 1-6 次隊までは、越冬隊の人数が 20 人未満だったため、発電設備と同じ建物の中に小さな造水装置を置き、周囲の雪を投入して雑用水とした。飲料水だけは氷山水を融解して使用した。第 7 次隊で南極観測船「ふじ」が就航し、継続的な基地運用が始まった。それにともない給水設備工事も行われ、湖水の利用が本格的に行われた。基地中心部に近い小さな湖の貯水量を確保するため、燃料の空ドラム缶に砂利を詰め、土嚢代わりに並べて堤防をつくりダムとした。第 7 次隊では、機械隊員の名前を取って、「荒金ダム」と呼称され現在に至っている。しかし、第 8 次隊の夏期にこのダムが増水し堤防が決壊したため、別の場所に新たなダムをつくり「第一ダム」と名付けた（図 4 参照）。水を入れ密封した空ドラム缶を 1 列 100 本ずつ 3 列に縦に配置し堤防とした。1 列と 2 列の間にはキャンバスシートを入れて漏れ防止とした（南極地域観測統合推進本部、1967）。このダムの水は、しばらく越冬用として使用されたが、第 20 次隊で夏期隊員宿舎ができてからは、主に夏期隊員用として使われている。図 5 に両ダムの上空からの写真を示す。その後、第一ダムの堤防は、第 48 次隊、第 49 次隊で新設道路（図 6）工事を行ったときに補強された（国立極地研究所、2008、2009）。これらのダムは現在も利用されている。

第 7 次隊では、比較的遠くにある湖水を基地まで運ぶために、給水車（図 7）を持ち込んだ。しかし、気温が下がると、水タンクのバルブが凍結するなど不具合が多発した。そのため、第 11 次隊では、130 kℓ 屋外水槽を新設し、第一ダムと荒金ダムからポンプとホースを使って送水することにした（図 8）。この大型水槽の完成により給水車の必要はなくなった。また、5 月から 12 月の期間中、ダムにヒーターを入れて冬期間も利用した。

荒金ダムは、夏期の融雪時に堤防がたびたび決壊した。第 33 次隊では、オーバーフロー用の排水口が凍結、長さ約 6 m にわたって決壊し、石・シート、足場材で補修した。第 46 次隊では夏期に護岸工事を行った。ダムの水を汲みあげ、凍土上に土嚢を積み上げ隙間をセメントで塞ぎ、その上からシートを張り土嚢で押さえた（図 9）。使用した土嚢は 1700 袋に達した（国立極地研究所、1993）。

3.2.1. 湖水の塩分濃度

昭和基地の主風向は北東から東北東である。基地周辺の積雪はほとんど海側から運ばれてくるため、湖水は塩分を含んでいる。そのため、湖水の凍結が始まると徐々に塩分濃度が高まり、飲料に適さない水質になる。第 11 次隊が越冬中の 1970 年 5-9 月における塩分濃度は、



図 4 荒金ダムと第一ダムの位置

Fig. 4. Locations of Aragane Dam and Daiichi Dam.

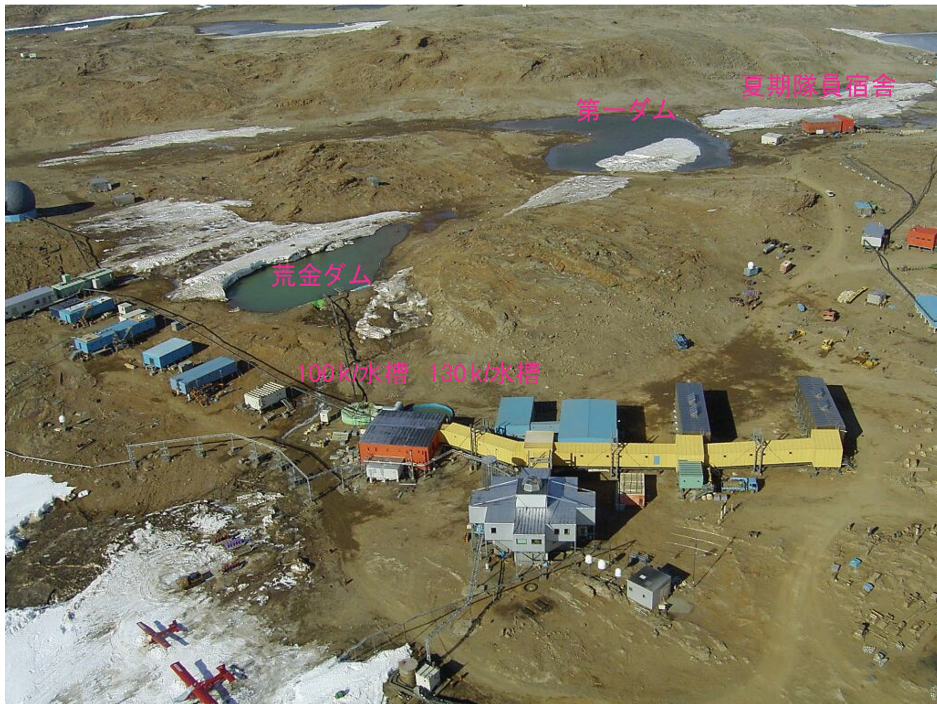


図 5 荒金ダムと第一ダム (2004年2月16日撮影)

Fig. 5. Aragane Dam and Daiichi Dam (Feb. 16, 2004).

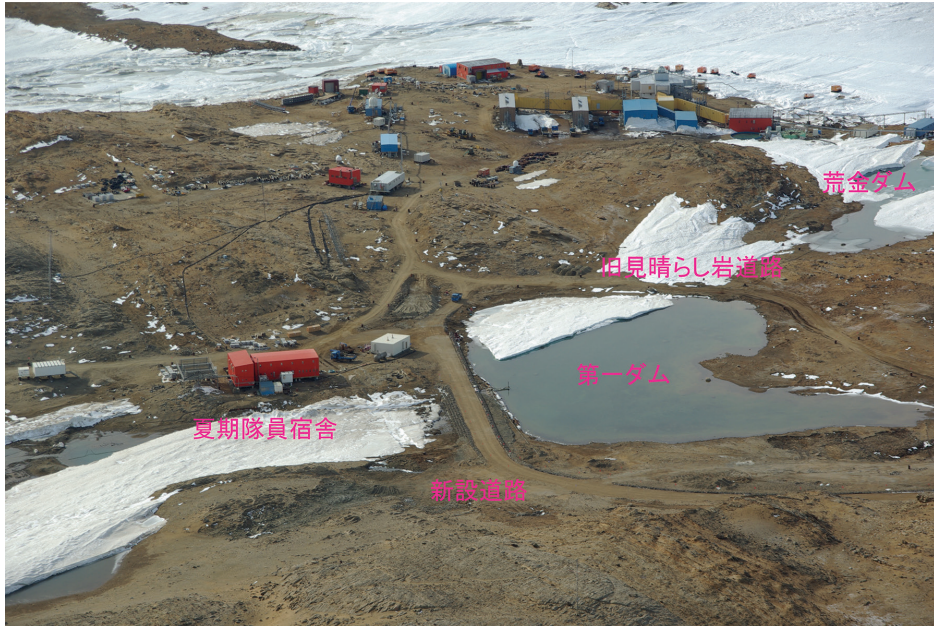


図 6 第一ダムの堤防横に建設した道路 (第 50 次隊撮影)

Fig. 6. New road constructed along with the bank of Daiichi Dam (photograph by the 50th JARE).



図 7 第 7 次隊で持ち込んだ給水車

Fig. 7. Water tanker introduced by the 7th JARE.

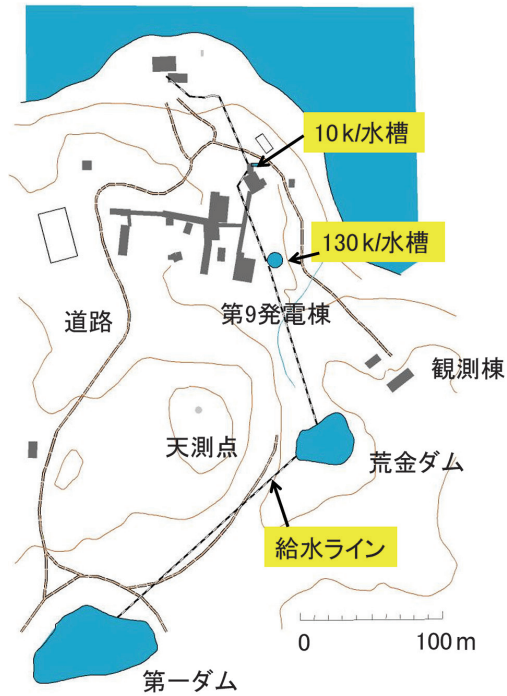


図 8 第 11 次隊で実施したダムと屋外水槽間の送水ライン (Awano *et al.*, 1982)
 Fig. 8. Water delivery line between dams and water tanks, as constructed by the 11th JARE (Awano *et al.*, 1982).



図 9 荒金ダムの堤防 (第 48 次隊撮影)
 Fig. 9. Dam wall at Aragane Dam (photograph by the 48th JARE).

おおよそ 900–1600 ppm であった（南極地域観測統合推進本部，1971）。塩素イオン濃度にすると、500–889 ppm となり（海のはなし編集グループ，1989; 付録 2 参照）、日本国内の水道水の水質基準である 200 ppm を数倍上回っている。そのため、湖からの取水は夏期の間だけに限り、冬期は、氷山氷を採取して屋外造水槽で融解する方式が一般的となった。

3.2.2. 脱塩装置の導入

南極観測船「しらせ」が就航した第 25 次隊では、第 24 次隊で建設した新発電棟の中に、200 kVA 発電機、コジェネレーション、造水、排水などの設備工事を行った。この中に、造水関連設備として、逆浸透膜を利用した脱塩装置が新設された。これは、それまでの氷山氷利用をやめて湖水や積雪を全年利用して良質の飲料水を得ることが目的だった（国立極地研究所，1985）。国内の水質基準である塩素イオン濃度 200 ppm（電気伝導度で $600 \mu\text{s}/\text{cm}$ ）以下の浄水を 1 日 5 m^3 製造できる能力がある。前処理として、 5μ と 1μ のフィルターで原水中の浮遊物を除去した。その後、ポンプで 3 MPa ($30 \text{ kgf}/\text{cm}^2$) に加圧され逆浸透膜（RO 膜）モジュールを通過し製造水が得られる。製造水の回収率は 40–50% で、残りは濃縮水として排水される。また、製造水は無菌状態であるが、給水配管からの雑菌の浸入を防ぐため、0.5–1 ppm の次亜塩素酸ナトリウム薬注ユニットも設備された。図 10 に脱塩装置の系統図を示す。また、図 11 には第 25 次隊越冬中の原水と製造水の水質を示した。2 月中旬から 4 月中旬は原水の塩分濃度が低かったので $30\text{--}100 \mu\text{s}/\text{cm}$ の製造水が得られたが、それ以降雪不足だったので、濃縮水を排水せず原水水槽に戻したため、7 月下旬には原水が $2300 \mu\text{s}/\text{cm}$ 、製造水が $370 \mu\text{s}/\text{cm}$ まで上昇した。しかし、濃縮水の回収をやめてからは、正常にもどった。

この装置の導入により、飲料水を確保するための氷山氷取り作業はなくなった。しかし、高圧ポンプの使用による電力と前処理に使用するフィルターおよび RO 膜など消耗品のコスト増が新たな負担となった。また、このシステムでは、投入した原水の約半量だけが製造水となり、半量は濃縮水として排出される。多量の融解熱で造水した半量しか使用できないのは大きな熱損失である。

この脱塩装置は、第 36 次隊で 10 kl/日 ($415 \text{ l}/\text{h}$) に更新された。必要電力は、ブースターポンプ (0.37 kW) および高圧ポンプ (3.0 kW) で、合計 AC200 V, 3.5 kW である。また、第 39 次隊では新たに次亜塩素酸ナトリウムの薬注ユニットを追加設備した。

3.3. 氷山氷の利用

東オングル島の周囲の海水上には氷山が点在し、飲料水として利用できる。しかし、安全に作業するためには、気温が低下し海水が安定している 3 月中旬から 12 月上旬までの期間での利用となる。氷山表面の氷をツルハシやチェーンソーで碎き、小さな塊にして櫓に積み込み小型雪上車で運び、水槽に投入する。この作業は、実施しない隊もときどきあったが、第 1–24 次隊まで行われた。ほぼ全員が交代で作業を行い、多くの時間と労力を要した。し

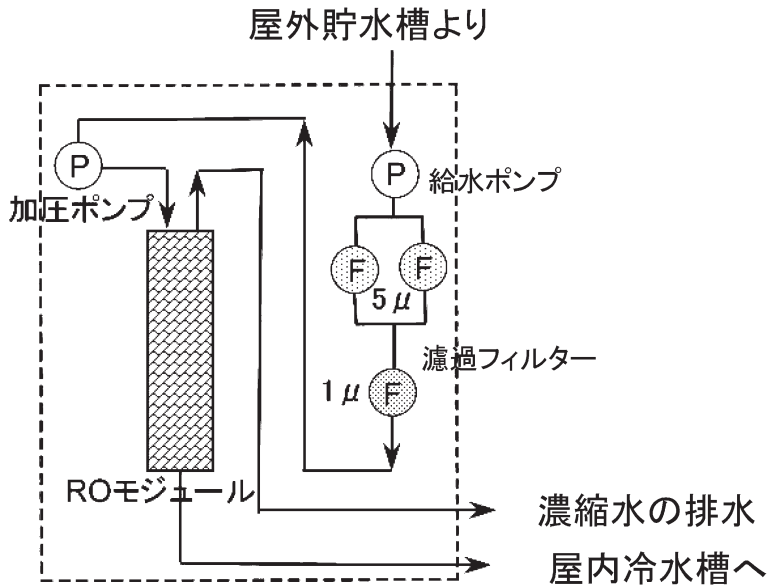


図 10 第 25 次隊で設置した脱塩装置の系統図

Fig. 10. System diagram of the desalination apparatus installed by the 25th JARE.

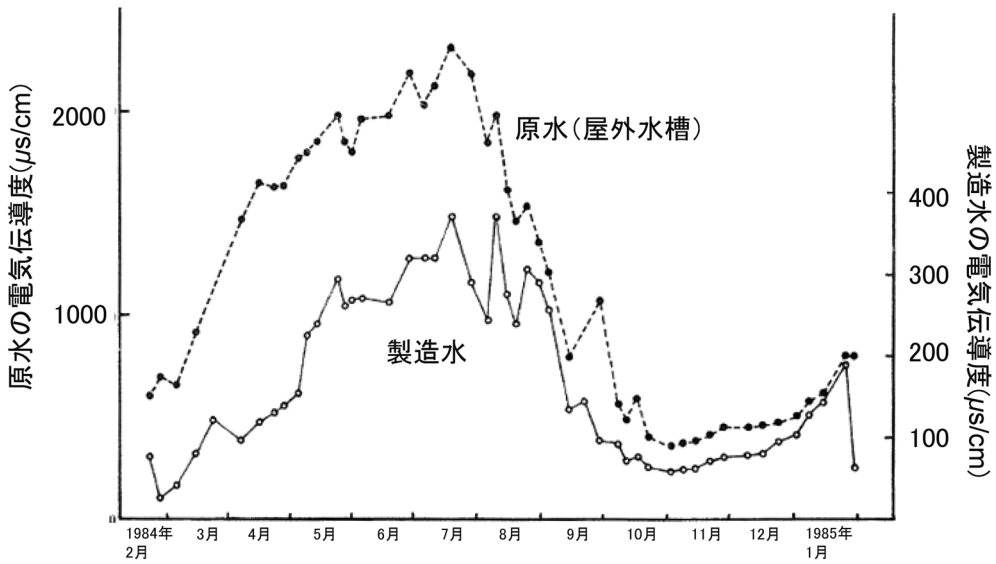


図 11 第 25 次隊越冬中の飲料水の水質

Fig. 11. Quality of drinking water during the 25th JARE wintering period.

かし、第 25 次隊で 2 基の屋外大型水槽の運用が始まってからは実施する必要はなくなった。図 12 は、第 15 次隊の氷山水採取作業の様子である。この隊では、6-12 月まではほぼ毎週 2 回、2 台の橇を使って実施した（国立極地研究所，1975）。

3.4. ブリザード時降雪の利用

第 25 次隊で設置した 130 k ℓ 水槽には覆いがなく、常時開放状態である。発電棟に隣接した風下側に設置することで、ブリザード時の降雪を自動的に取り込むよう計画した。この方法は、エンジン発電機容量が大きく機関冷却水熱がふんだんに使えるようになったために可能になった。ブリザードの襲来が少ない年には、水槽まわりの雪を人力で投入することで対処した（図 13）。

4. 造水熱源

4.1. 概要

第 1 次越冬隊以来現在まで、基地の電力源は、ディーゼルエンジン発電機である。基地再開前の第 5 次隊までは、20 kVA 発電機 1 基での運用を行い、第 7 次隊で 45 kVA 発電機を新発電棟に設置した。さらに第 9 次隊では、別の発電棟を新設し、一般用電源用として 65 kVA 発電機を増設した。第 7 次隊で導入した 45 kVA 発電機は観測専用として使った。第 1 次越冬隊以来、造水熱源にはエンジン発電機の排気熱を利用した。エンジン冷却水熱は、主に室内暖房に使った。エンジン発電機の 2 基運転は燃料消費率が悪いので、第 19 次隊で



図 12 氷山水の採取

Fig. 12. Breaking of iceberg for drinking water.



図 13 130kl 水槽への雪入れ (2012年7月27日撮影)
Fig. 13. Snow casting into the 130kl water tank (July 27, 2012).

は 115kVA エンジンの 1 基運転に変更した。また、これまでのコジェネレーション熱供給方式を変更し、造水熱源として冷却水熱と排気熱を利用することになった。さらに第 25 次隊で 200kVA 発電機を導入し、長年利用してきた排気熱の利用は、配管腐食や煤の問題があったため取りやめ、冷却水熱だけを使うことになった。

4.2. 第 1-6 次隊

南極観測隊の機械関係の準備組織として、1956年2月に日本機械学会に南極地域観測機械関係準備委員会が設けられた(文部省, 1963)。この委員会では、学会委員をはじめ機械担当隊員、諸会社の協力によって短時間で準備が行われた。必要な車両や機械設備がすべて国産の技術で製作・試験が行われ南極に持ち込まれた(Special Committee on Engineering for the Japanese Antarctic Research Expedition of Japan Society of Mechanical Engineers and Technical Members of the First, Second and Third JARE, 1959)。

第 1 次隊では、20kVA 発電機の排気熱を利用した造水装置を持ち込み、雑用水と飲料水を得た。雑用水は雪を溶かし、飲料水は氷山水を使った。1人1日平均 20l と見積もって、二つに分割した造水タンクの総容積は、930l であった。これで 40 人分賄えるという計画だった(Awano and Maita, 1963)。

熱源としてエンジンの冷却水熱利用の装置も持ち込んだが、実際に使ったのは排気熱だけだった。これで十分な熱量が得られた。その後改良を加え、第 3-5 次越冬隊でもこの方式を

使用した。排気ガス熱交換器は、いわゆるシェルアンドコイル方式で、鉄製の螺旋コイルの中を水が循環し、その周囲に排気ガスを通して熱を回収するものだった。エンジン排気熱が使えないときのために、造水槽にはオイルバーナーを取り付け、熱源を確保したが、1回も稼働しなかった。

4.3. 第7-18次隊

第7次隊では、南極観測船「ふじ」が新たに就航し、昭和基地は約4年間の無人基地の時代に終止符を打って再開した。発電棟を新設し内部に45kVAエンジン発電機を2基設置した。

第9次隊では65kVA発電機を新設し一般用電源とした。従来の45kVA発電機は観測用の電源として併用した。この状態は第18次隊まで続いた（文部省，1982）。この間、造水熱源として発電機の排気熱を利用した。第7次隊では、新設した発電棟の中に3基の造水タンクを設置した。熱源はすべて発電機の排気熱である。また、第8次隊では10kl屋外水槽を設置し、水槽内にステンレス製のラジエーターを入れて放熱した。また、排気ガス熱交換器は、縦型のステンレス製シェルアンドコイルタイプだった。屋外に設置したタンクの熱量が足りない冬期には、たびたび投げ込み式電気ヒーターでバックアップした。

4.4. 第19次隊以降

第18次隊までは65kVA発電機を一般雑用電源、45kVAを観測用電源として使っていたが、第19次隊からこの方式を変更し、115kVA発電機1基運転とした。これにともない、10kl水槽にはエンジン冷却水熱、130kl水槽には排気熱を供給した。また、排気ガス熱交換器として、直管型、フィン型を搬入し効率を比較した（Awano *et al.*, 1982）。

第25次隊では新発電棟に設置した200kVA発電機の運転となり、エンジン冷却水熱だけの造水システムとなった。それまで長年行ってきた排気熱の利用は、配管腐食（付録3参照）や煤の詰まりなどの問題があったため、取りやめになった。

5. 貯水槽

5.1. 概要

第1-6次隊までは、屋内の小さな水槽で造水を行った。第7次隊では、屋外に3.5klのロールゲートタンクを2基設置し、夏期は湖水を使い、冬期にはエンジン発電機の排気熱で融雪した。屋内には650klの造水タンクを4基設置し、屋外タンクと併用した。貯水量の合計は屋外・屋内タンクを合わせて10klで、水温を40℃に保った。屋外タンクの水をポンプで室内のタンクに汲み上げ、フィルターを通した後、給水した。第8次隊では10kl屋外水槽を第7発電棟の北側に設置した（南極地域観測統合推進本部，1967）。

第9次越冬期間中は、積雪量が極めて少なく、4月中旬まで給水車を使って池の水を遠く

から運ぶなど水不足に苦しんだ。そこで第 11 次隊では、越冬中の水を夏期にできるだけ確保するため、第 9 発電棟の横に 130 kℓ 水槽を建設した。この水槽と荒金ダム間に送水ラインを設け、5 月以降はヒーターを入れて融雪し 12 月まで送水を行った。また、10 kℓ 水槽との間もビニールホースで連結した。この新たな貯水方法により、給水車の使用も必要なくなり、冬期間の雪入れもなかった（南極地域観測統合推進本部，1971）。荒金ダムと屋外水槽を併用する貯水システムは、現在まで続いている。

5.2. 10 kℓ 屋外水槽

第 8 次隊が設置したこの水槽は、南極用に特別設計したものである。断熱したステンレス鋼板で外壁を組み立て内側に防水シートを落とし込んだもので、天井蓋も付いている。大きさは、4 m×3.9 m×0.88 m の直方体で天井には 1.7 m×0.6 m の雪投入用の開口部がある（図 14）。エンジン発電機の排気熱交換器で加温した水を、水槽内に設置したラジエーターに循環させ水槽内部加温した。冬期には水温が下がるため、夜間だけ 5 kW の投げ込みヒーターを入れ保温した（南極地域観測統合推進本部，1968）。この水槽は、第 24 次隊まで使用した。

5.3. 130 kℓ および 100 kℓ 屋外水槽

越冬中の水不足を解消するため、第 11 次隊では波状鉄板の内側に樹脂製シートを張った 130 kℓ 水槽を組み立て、第 9 発電棟横の東側に設置した。タンクの外側には保温および防塵用のカバーを取り付けた。熱源として 65 kVA 発電機の排気熱を利用した（南極地域観測統合推進本部，1971）。荒金ダムとこの水槽間 145 m を塩ビパイプで連結し、ダムに設置した水中ポンプで送水した（図 8）。また、130 kℓ と 10 kℓ 水槽間 70 m には、ビニールホースを設



図 14 第 8 次隊の 10 kℓ 屋外水槽

Fig. 14. Outside water tank (10 kℓ capacity) installed by the 8th JARE.

置した。この水槽の新設により、夏期の給水車による湖水の運搬と造水槽への雪入れ作業がなくなった。この大型水槽の設置は、昭和基地の飲料水確保にとって大きな前進であった。

第23次隊では、新発電棟の基礎工事にともない、第11次隊設置の130 kℓ水槽を撤去し、100 kℓ水槽（図15）を新規導入した。水槽の保温は、130 kℓ水槽同様、排気熱による温水を利用し18–32℃に保った。第25次隊では、第24次隊で完成した新発電棟に隣接した風下に直径12000 mm、高さ1440 mmの円筒型130 kℓ水槽（図15）を設置した。この水槽は屋根がない開放型で、水槽外壁の断熱もなく一年を通して水面が露出している。このため、ブリザード時には、自動的に雪が補給され便利であるが、強風時に異物が混入したり水槽内の水が攪拌されたりして、ポンプやバケットストレーナーの目詰まりを起こすトラブルが多発した。（国立極地研究所、2006）。また、熱損失が大きく、水温が低下するのが欠点である。大型水槽の利用は、それまで行われていた積雪または氷山水の投入の労力が減った反面、給水設備への不具合が増える結果となった。すなわち、雪の沈降力によるポンプや配管、熱交換器の破損、配管系統への異物の混入や目詰まりの発生などである。

6. 造水配管回路

6.1. 概要

年間を通してダムの水を利用するためには、発電棟近傍にある水槽とダム間を配管で連結



図15 100 kℓと130 kℓ屋外水槽（第24次隊撮影）

Fig. 15. Outside water tanks with 100 kℓ and 130 kℓ capacities (photograph by the 24th JARE).

しなければならない。これは、第11次隊で130kl水槽を設置したときから必要とされた。第11次隊は、塩ビパイプでの仮設配管だったが、第12次隊では、架橋上に電熱線付きの断熱パイプを載せて送水した。第27次隊では、100kl水槽内にプレート式熱交換器を新設し、荒金ダムから汲み上げた水をこの熱交換器で加温する荒金ダム循環回路を構築した(図16)。これにより、ダムの水は一年を通して使えるようになった(国立極地研究所, 1987)。配管は、32A架橋ポリエチレン管にゴム系独立発泡断熱材を巻いた保温管で、架台はなく地面に直接設置した。第28次隊では、100kl水槽から荒金ダムまでの配管架台工事をを行った(国立極地研究所, 1988)。しかし、この配管架台は第31次隊で破損したため修繕が必要になった(国立極地研究所, 1991)。第32次隊では熱交換器小屋(図17)を建設し、100kl水槽内の熱交換器をこの小屋に格納した。また、130kl水槽の熱交換も一緒にこの一台にまとめた。さらに、配管口径もサイズアップした。図18に造水配管系統図を示す。第42次隊では、造水配管の全面的な改修を行い、100klおよび130kl水槽用の熱交換器および循環ポンプを発電棟内に設置しメンテナンス性の改善を行った。しかし、130kl水槽循環ポンプストレーナーの目詰まりが頻繁に発生し、清掃後のエア抜き作業に手間が掛かり過ぎるという問題が発生

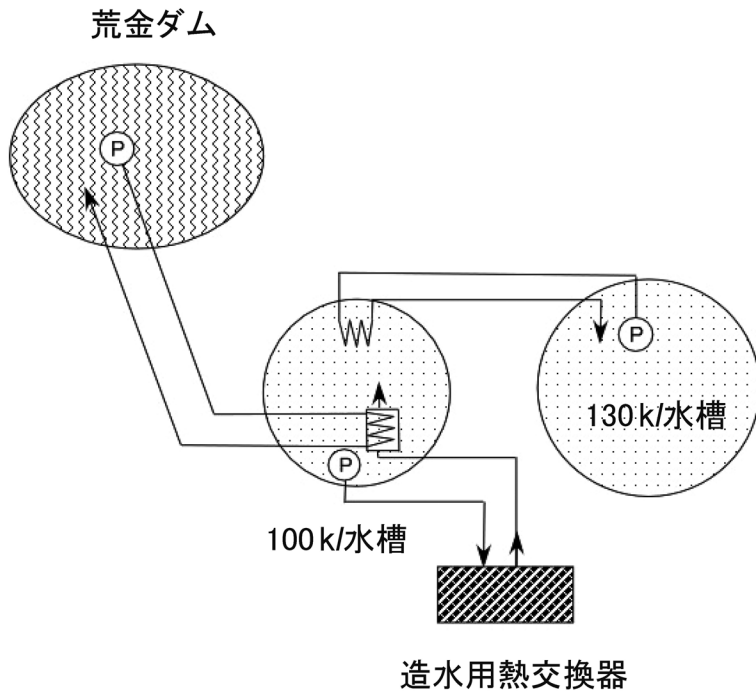


図 16 第27次隊の荒金ダム—100kl水槽の水循環回路

Fig. 16. Water circulation circuit between Aragane Dam and the 100kl water tank conducted by the 27th JARE.



図 17 第 32 次隊で建設した熱交換器小屋

Fig. 17. Hut for the heat exchanger, as constructed by the 32nd JARE.

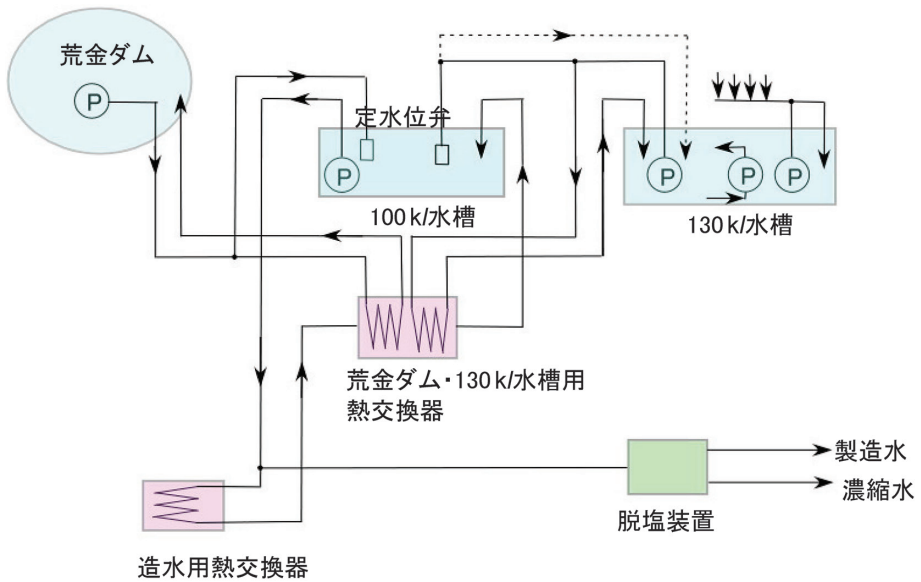


図 18 第 32 次隊で改良した造水配管系統図

Fig. 18. Improved water supply system provided by the 32nd JARE.

したため、第44次隊で130 kℓ水槽内に水中ポンプを増設することになった。第44次隊で改修後の造水配管系統図を図19に示す。

6.2. 雪の沈降力への対処

100 kℓ水槽から荒金ダムまでの配管架台は、雪の沈降力により何度も変形したが、夏の融雪時にも修理が追いつかず、冬になると再び積雪に埋没するという状況を繰り返してきた。図20は配管架台ではないが、配線架台の支柱が雪の沈降力で破損した例である。第43次隊では、この配管架台上の循環ラインを新しい断熱配管（ミニサーモ）に更新した（図21）。

また、荒金ダムの取水口のポンプ取り付け部分の架台も雪の沈降力で何度も破損した。鉄製などの強度のある構造物でつくっても、雪の塑性変形に起因する沈降力には負けてしまう。発電棟から130 kℓ水槽までの屋外配管架台でも同様の現象が発生し、毎年のように修繕する必要があった。このため、第42次隊では、大規模な屋外設備の更新を行った。一つは130 kℓ水槽横に波状鉄板製の配管メンテナンス坑を建設し、発電棟から130 kℓ水槽までの露出した配管をこの小屋内に収めることにした（図22）。また、荒金ダムの取水ポンプは、ダムの中央部まで栈橋をつくり吊り下げていたが、第47次隊からは、雪の沈降力に弱い栈橋方式をやめ、土手に沿ってホースを延ばし、池の底に固定した単管パイプを支柱にしてポンプを沈めるようにした。

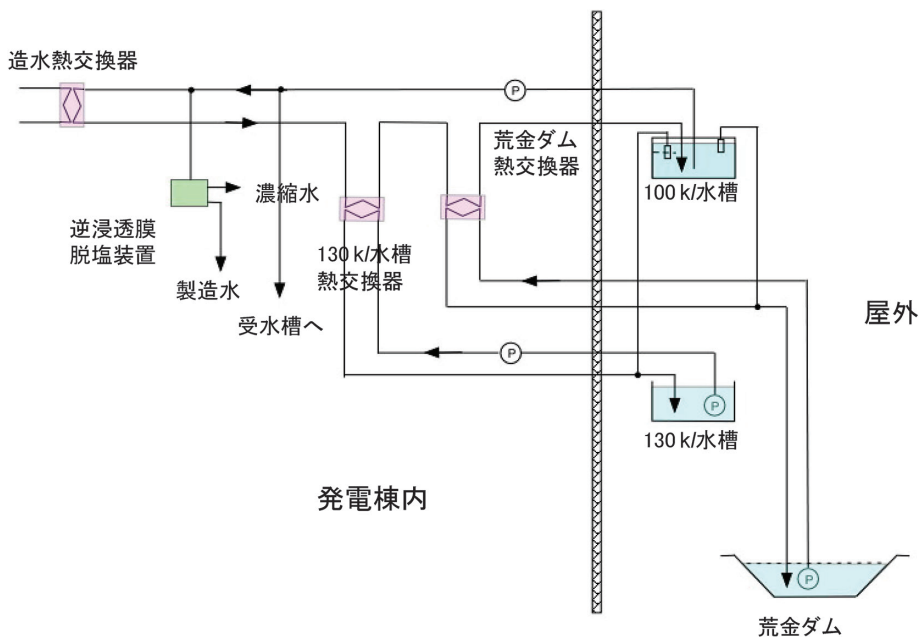


図19 第44次隊で改良した造水配管系統図

Fig. 19. Improved water supply system provided by the 44th JARE.



図 20 雪の沈降力で破損した配線架台 (2005年10月1日撮影)
Fig. 20. Wiring support destroyed by settling snow (Oct. 1, 2005).



図 21 荒金ダムー屋外水槽の波状プラスチック断熱配管 (第48次隊撮影)
Fig. 21. Heat-insulated piping with corrugated plastic material. The pipe runs between Aragane Dam and the outside water tank (photograph by the 48th JARE).



図 22 130kl 水槽横に建設した波状鉄板製配管格納庫
Fig. 22. Steel corrugated shed for piping, near the 130kl water tank.

7. 造水に要する熱量

第 25 次隊で 200kVA 発電機を新たに導入したが、電力需要に対処するため、第 37 次隊が 300kVA 発電機に更新した。また、第 39 次隊が越冬中の 1998 年 4 月 1 日から、発電機の出力、燃料消費量、コジェネレーションの利用熱量などを監視・記録するシステムが稼働した。これにより、発電機の熱出力の内訳が 1 時間ごとに記録されるようになった。この記録から造水のために使用した熱量を求めた。

7.1. コージェネレーションシステムの熱負荷

図 23 に 300kVA 発電機に更新して以来、現在も使用されているコージェネレーションシステムの系統図を示す。熱出力源は三つある。エンジン発電機本体の冷却水熱として、ジャケット冷却水熱とクーラー冷却水熱、それと排気熱である。利用する側としては大きく三つに分類できる。一つは、空調利用熱量として、ジャケット冷却水熱に排気ガスボイラーで得た熱量を加えて室内暖房に用いる。次が温水利用熱量で、厨房・風呂などに温水を供給するほか、浴槽水の過熱に用いる。最後が造水利用熱量である。これは主にクーラー冷却水熱を利用している。これら三つのそれぞれの使用熱量 (Q_n) は、それぞれの熱交換器の一次側の循環水量 (G) と入り口温度 (T_1)、出口温度 (T_2) の温度差に熱交換器の効率 (h) および途中の配管の熱損失 (Q_p) から次式で計算される。

$$Q_n + Q_p = h (T_1 - T_2) \times G \quad (1)$$

(1) 式で $h=1$ と仮定して、それぞれの Q_n+Q_p を求めた。図 24 は、第 51 次隊 (2010 年 2 月～2011 年 1 月) の電力負荷とそれぞれの熱負荷を示したものである。三種類の年間平均熱負荷の合計は、電力負荷の 87% となっている。また、三種類の熱負荷のうち、造水利用熱量が最も多く、全熱負荷の 70% を占めている。

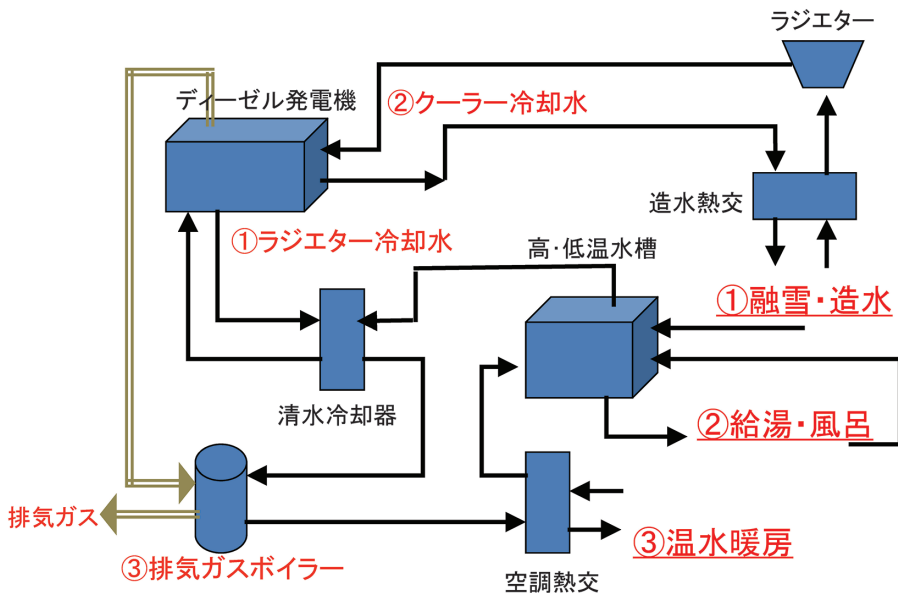


図 23 300kVA エンジン発電機のコージェネレーション系統図

Fig. 23. System chart of waste heat utilization of a 300 kVA engine generator.

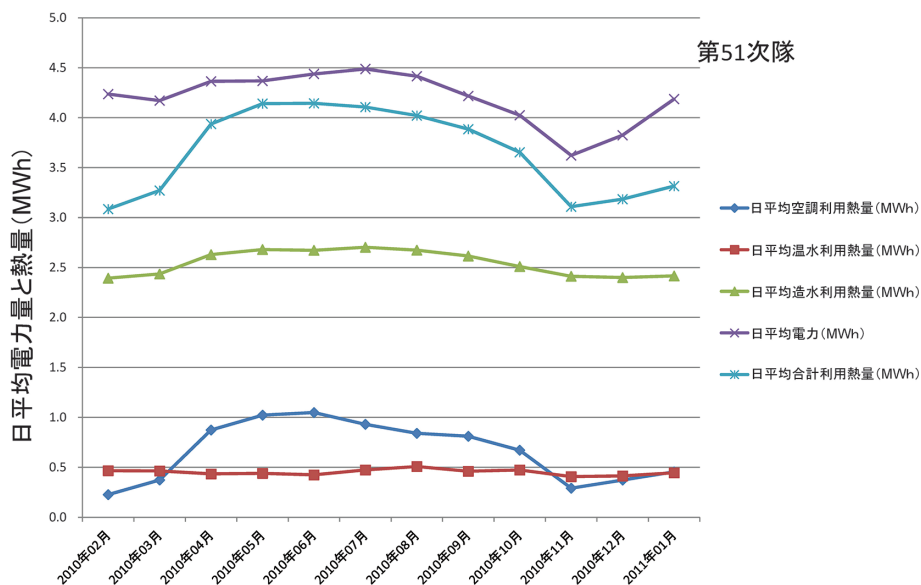


図 24 第 51 次隊越冬中の日平均電力負荷と熱負荷

Fig. 24. Daily-averaged electric load and heat load during the 51st JARE wintering period.

7.2. 造水利用熱量の内訳

造水熱交換器の二次側の配管系統を図 25 に示す。130 kJ 水槽および荒金ダム用の専用熱交換器が造水熱交換器の二次側に設置されている。それぞれの熱交換器二次側の入口、出口の水温が 1 日 2 回（午前 11 時と午後 11 時）機械隊員により読み取られ、記載される。また、流量計の読み取り記録から、そのときの流量を知ることができる。この二つの熱交換器を通過した温水は最後に、蓋付断熱構造の 100 kJ 水槽に熱を供給し、造水熱交換器の二次側に戻る。図 26, 27 に、第 52 次隊（2011 年 2 月～2012 年 1 月）および第 53 次隊（2012 年 2 月～2013 年 1 月）越冬中の記録から計算した 130 kJ 水槽と荒金ダムの月ごとの使用熱量を示す。各水槽への熱の供給は、130 kJ 水槽の雪氷の融解状態や水温などをもとに、機械隊員の判断で流量バルブの調整が行われるので、両者の定量的な比較はできないが、ほぼ同程度の熱量を使用していることがわかる。

8. 将来の造水方法

8.1. 現在の方法及び海水淡水化法

約 55 年間にわたる昭和基地での生活水の確保についてレビューした結果、以下のことが明確になった。

(1) 自然の湖と水槽を貯水設備として、氷山氷、積雪を水源としてきた。そのため、氷山氷の採取や水槽への雪入れに多大な労力を払ってきた。

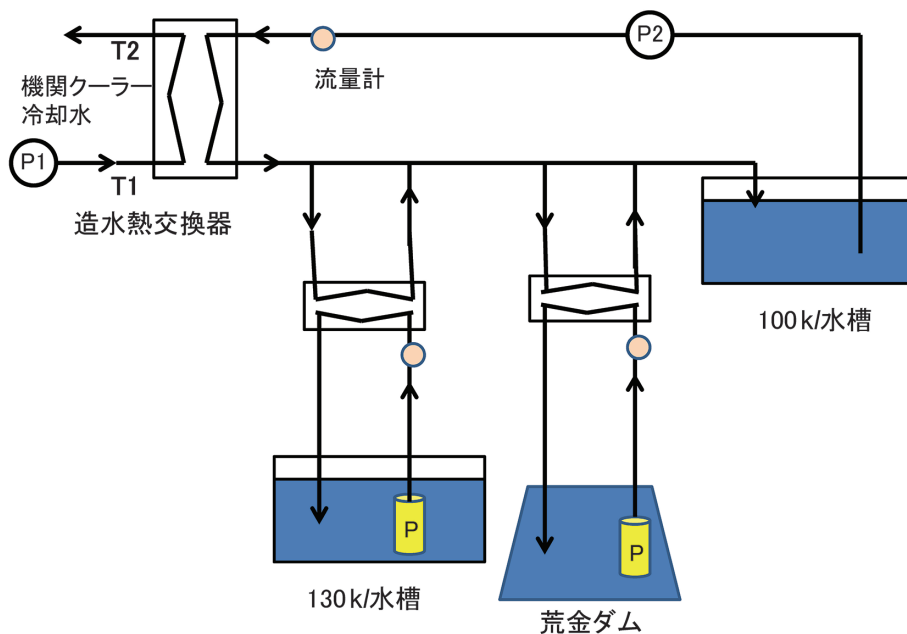


図 25 造水熱源の系統図

Fig. 25. System chart of the water-melting heat source.

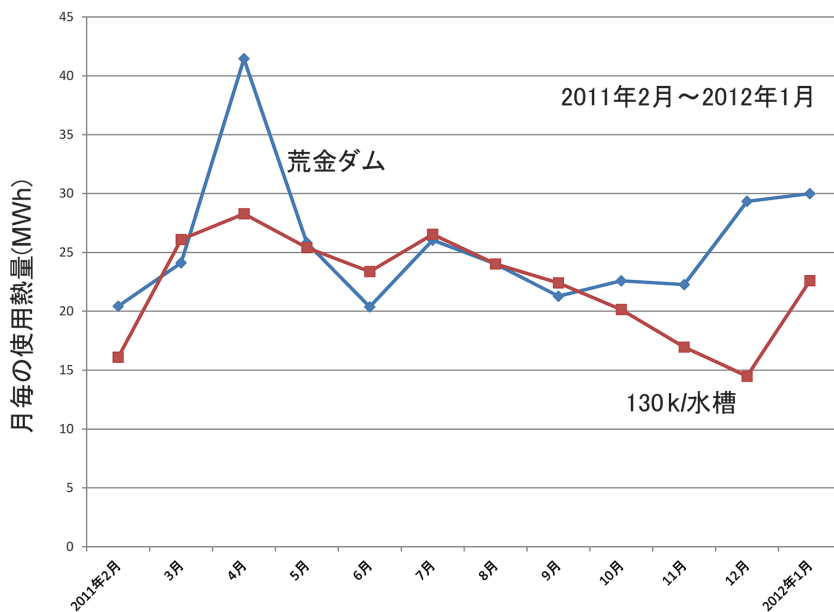


図 26 第 52 次隊越冬中の 130kl 水槽および荒金ダムでの使用熱量

Fig. 26. Amount of heat used for the 130kl water tank and Aragane Dam during the period of the 52nd wintering party.

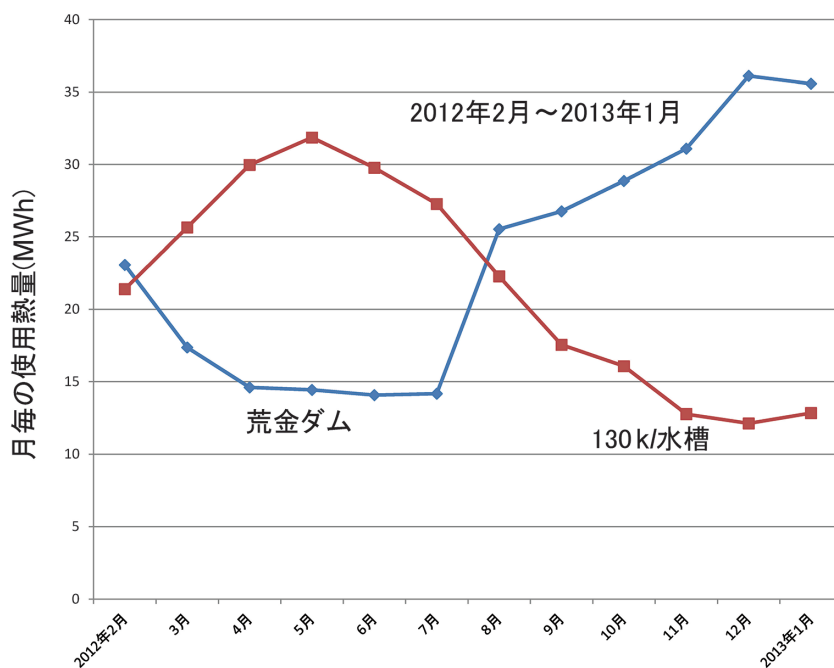


図 27 第 53 次隊越冬中の 130 kl 水槽および荒金ダムでの使用熱量

Fig. 27. Amount of heat used for the 130 kl water tank and Aragane Dam during the period of the 53rd wintering party.

- (2) エンジン発電機の廃熱（前期は排気熱，後期は冷却水熱）を有効に利用して造水した。
- (3) 冬期の塩分濃度の増加には，氷山水を融解して飲料水としたが，第 25 次隊以降は脱塩装置の導入で対処した。しかし，投入した原水の半量しか製造水として使用できないため，造水熱量の 1/2 が失われた。
- (4) 雪の沈降力による屋外配管が変形・破損し，そのメンテナンスに多大の労力を払ってきた。
- (5) 造水熱量は，7.1 節で述べたように，電力負荷の約 60%（全熱負荷が電力負荷の 87%，造水熱量は全熱負荷の 70%）にも達している。そのため空調利用熱量が不足し温水ボイラーの運転が必要となっている。

以上のことを踏まえると，現在の造水法は，メンテナンスに要する労力および熱量の点から効率的でなく，海水の利用が将来の生活水確保として有利であると考えられる。昭和基地の周囲は，通常，一年を通して厚い海水に覆われているものの，海水を掘削しポンプで海水を汲み上げれば無尽蔵の安定した水源が得られる。また，氷から水を得るためには，大きな融解熱が必要である。一日 10t の生活水を得るために必要な熱量を -20°C の氷から得る場合と， -2°C の海水から得る場合について計算した（付録 4 参照）。氷から得る場合は，海水利

用の7.1倍の熱量が必要となる。水の大きな融解潜熱が原因である。海水利用の場合は、逆浸透膜に加圧する高圧ポンプと海水の循環ポンプが主な必要電力であり、昭和基地に必要な10kWh/日の装置としては、10kW程度の電力で十分と考えられる。その結果、エンジン発電機のコージェネレーション廃熱は、造水熱量が大幅に減るため、居住施設の暖房などに使うことができる。現在使用している温水ボイラーの稼働は必要なくなるだろう。図28には、各国の南極基地で採用している造水方法（石沢, 1998; 石沢・北川, 2007; Japan, 2010; Norway, 2009）を示した。海洋に面している基地の多くが海水淡水化法を採用しているのがわかる。ちなみに、ロドリゲス井戸とは、氷床に温水などの熱源を供給し氷を融解・貯水し、必要に応じてポンプで汲み上げ飲料水を得る方法である。また、貯水タンクとは、雪氷をタンクに集め融解する方法である。

海水利用の欠点としては、配管の腐食、海洋生物のフィルターリングなどがある。さらに、2-3m以上の厚さの水を掘削して配管する際、潮汐による約1mの海水面の上下を考慮した工夫が必要である。また、海水を汲み上げ逆浸透膜で脱塩するとき、原水の約半量は濃縮水として海洋に戻す必要がある。しかし、この濃縮水は、いわゆる中水としてトイレの洗浄水などに使用できる。また、配管を二重管にして外側の管に濃縮水を流せば配管の保温に利用できる。

8.2. 海水利用のヒートポンプによる暖房

海洋と造水装置が設置された建物間を常時海水が循環するパイプラインが完成すれば、約-2℃の海水熱源を利用したヒートポンプ暖房の可能性も考えられる。海水利用のヒートポンプ空調は、最近では、海水、地下水、河川水、下水などの未利用エネルギーとしての活用が目されており、寒冷地での実用化も試みられている（Hani and Koiv, 2012; Zhen *et al.*, 2007）。南極においては、海水は空気より温度が一定でしかも比較的高温なため、ヒートポンプの熱源としては良質である。今後の研究開発が望まれる。

9. まとめ

日本南極地域観測隊は、湖水や氷山水および積雪を水源として、エンジン発電機の廃熱を有効に利用して生活水の確保をこれまで行ってきた。しかし、積雪の多少による湖水の量や不安定な氷氷上の氷山水の運搬など不安定要素が多く、造水作業と設備のメンテナンスに多大な労力を投入してきた。また、氷の融解潜熱が大きいことから、エンジン発電機の廃熱利用とはいえ、総電力負荷の半分にも相当するエネルギーを要している。

これらのことを考慮したとき、将来の造水方法としては、水源の安定性、省エネルギーおよび設備のメンテナンスなどの観点から海水淡水化法が望ましい。また、海水の汲み上げ配管設備を利用した海水によるヒートポンプ空調も期待できる。

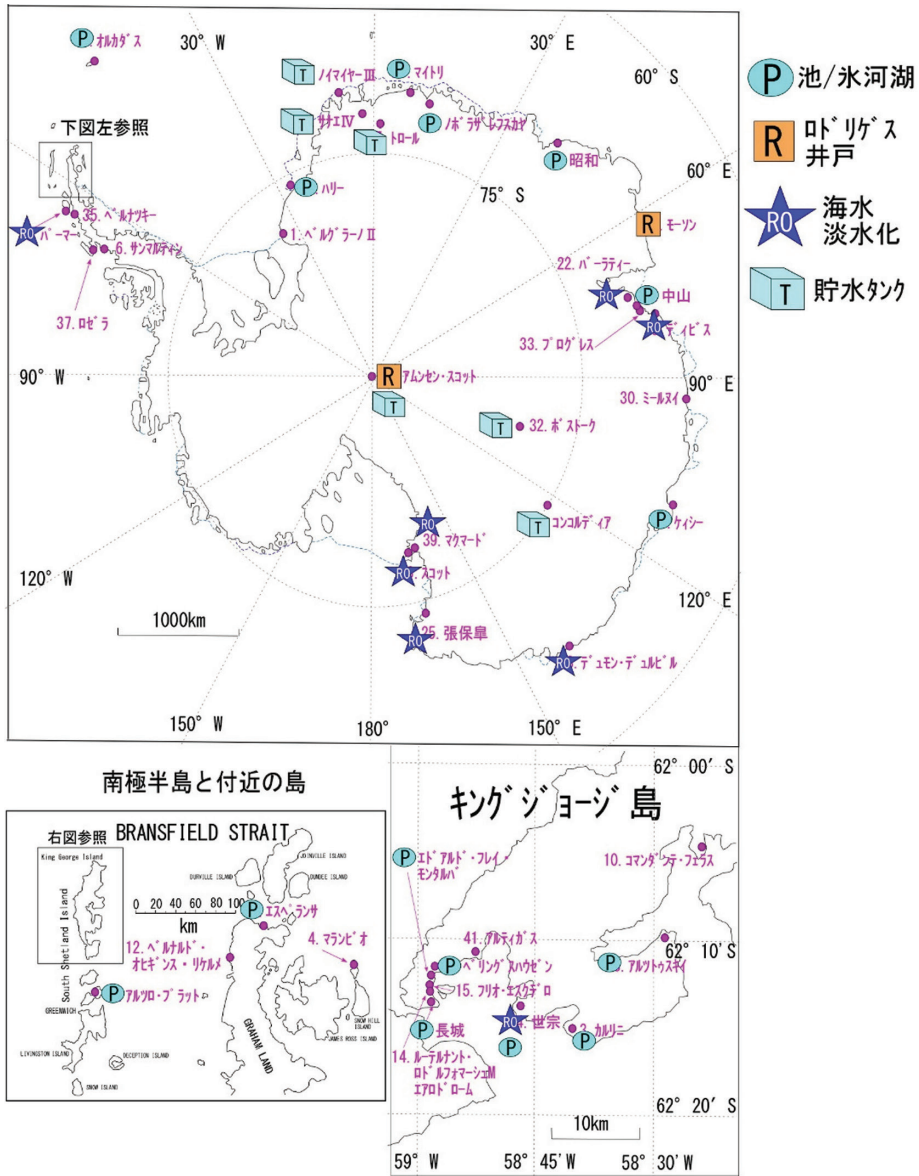


図 28 南極各国基地の造水方法
 Fig. 28. Water supply at Antarctic stations.

謝 辞

さまざまな試行錯誤を行いながら造水に苦勞され、その貴重な記録を残された歴代の隊員、特に機械隊員の皆様に敬意を表します。国立極地研究所南極観測センターの藤野博行さんには昭和基地からのコジェネレーション関連のデータ回収および第55次越冬機械隊員への調

査要請の便を図っていただきました。第55次越冬隊員の方には現地の設備について調査していただきました。

また、現在使用しているコジェネレーション発電設備と造水方法を計画・実施された元国立極地研究所観測協力室長の竹内貞男氏には、システムの詳細やその当時の経緯について教えていただきました。国立極地研究所の野元堀隆さんには、関連写真の検索に協力していただきました。さらに、隊員経験者から多くの情報をいただきました。日本大学理工学部の西川省吾さんには、造水に要するコジェネレーションの熱量が多大なことを指摘していただきました。このご指摘が、このレビューを執筆するきっかけになりました。外国隊の造水方法については、著者のひとりが外国基地を訪問した際、担当者から説明していただきました。また、各国の査察報告書などを参考にしました。ニュージーランド南極局やオーストラリア南極局の方からは、基地設備に関する情報を提供していただきました。以上の皆様に心から感謝致します。

文 献

- アクアス株式会社 (2014): pH と電気伝導率について深く知ろう。AQUAS Info, **50**. http://www.aquas.co.jp/doc/aquatec/info_pdf/info_vol_50.pdf.
- Awano, S. and Maita, S. (1963): Cold and hot water making equipment utilizing the exhaust-gas energy of diesel engines coupled with electric generators. Symposium on Antarctic Logistics, ed. by National Academy of Science-National Research Council. Washington, D.C., 254-280.
- Awano, S. and Takeuchi, S. (1985): Energy problems in the logistics of Japanese Antarctic Research Expedition from 1956 to 1984. *Nankyoku Shiryo* (Antarctic Record), **84**, 63-79.
- Awano, S., Takeuchi, S. and Muto, M. (1982): Energy saving at Syowa and Mizuho Stations. *Memoirs of National Institute of Polar Research. Ser. F, Logistics*, **4**, 110 p.
- Hani, A. and Koiv, T.-A. (2012): The preliminary research of sea water district heating and cooling for Tallinn coastal area. *Smart Grid and Renewable Energy*, **3**, 246-252, doi:10.4236/sgre.2012.33034.
- 石沢賢二 (1998): マクマード基地, アムンゼン・スコット南極点基地およびスコット基地の設営活動. *南極資料*, **42**, 196-225.
- 石沢賢二・北川弘光 (2007): オーロラ・オーストラリスによる輸送とオーストラリアのケーシー基地およびマッコリー島基地の施設. *南極資料*, **51**, 209-240.
- Japan (2010): Japanese inspection report 2010: Inspections under Article VII of the Antarctic Treaty and Article 14 of the Protocol on environmental protection. January 29 to February 10, 2010. 88 p.
- 国土交通省水管理・国土保全局水資源部 (2014): 平成26年版日本の水資源. 東京, 社会システム, 278 p.
- 国立極地研究所 (1974-2014): 日本南極地域観測隊第14-53次隊報告. 東京.
- 国立極地研究所 (2013): 基地要覧 (第25版). 東京, 79.
- 文部省 (1963): 南極六年史. 東京, 9.
- 文部省 (1982): 南極観測二十五年史. 東京, 226.
- 南極地域観測統合推進本部 (1966-1973): 日本南極地域観測隊第7-13次報告. 東京.
- 日本学術会議南極特別委員会 (1958, 1960-1962): 第1, 3-5次南極地域観測隊報告. 東京.
- Norway (2009): Report of the Norwegian Antarctic Inspection under article VII of the Antarctic Treaty: February 2009. 37 p.
- Special Committee on Engineering for the Japanese Antarctic Research Expedition of Japan Society of Mechanical Engineers and Technical Members of the First, Second and Third JARE (1959): Report of the Mechanical Engineering Committee for the Japanese Antarctic Research Expedition. *Nankyoku Shiryo* (Antarctic Record), **8**, 57-128.

海のはなし編集グループ (1984): 海のはなし 2. 東京, 技報堂出版, 173 p.

Zhen, L., Lin, D.M., Shu, H.W., Jiang, S. and Zhu, Y.X. (2007): District cooling and heating with seawater as heat source and sink in Dalian, China. *Renewable Energy*, **32**, 2603–2616, doi:10.1016/j.renene.2006.12.015.

付録 1 観測隊報告書からの造水に関する抜粋

Appendix 1. Excerpts related to water supply from JARE reports.

隊次	越冬期間	発電機	水源	造水熱源	造水槽	屋外配管	越冬隊員	年間造水量	特記事項
1	1957-1958	20 kVA	雑用水は雪、飲料水は氷山水	20 kVA 発電機の排気熱	室内造水槽 (雑用水と飲料水で合計 930 l の容量)		11		
2	越冬なし						0		
3	1959-1960	20 kVA		20 kVA 発電機の排気熱	室内造水槽		14		
4	1960-1961	20 kVA		20 kVA 発電機の排気熱			15		
5	1961-1962	20 kVA		20 kVA 発電機の排気熱	室内造水槽		16		
6	越冬なし						0		
7	1966-1967	45 kVA	夏期: 池 (給水車で運搬) 冬期: 積雪	45 kVA 発電機の排気熱	屋外 3.5 kJ コルゲートタンク×2 個		18	292 kJ 800 //日	夏冬平均
8	1967-1968	45 kVA 20 kVA	夏期: 池、海水パドル水 冬期: 積雪	45 kVA 発電機の排気熱	10 kJ 水槽シート張り、断熱ステンレス鋼板ブロック (キャンパスシート覆い)		24	460 kJ 1260 //日 53 //人日	10 kJ 屋外水槽を新設。冬期に 5 kW の投げ込みヒーター使用
9	1968-1969	65 kVA 45 kVA	4月11日まで池 (給水車で運搬) 氷山水と積雪	65 kVA 発電機の冷却水・排気熱			28	539.2 kJ 52.8 //人日	水槽内の熱交換器はコイル方式。雪入れは隔日半数ずつ。写真用は氷山水
10	1969-1970	65 kVA 45 kVA	8月18日まで池 (給水車で運搬)	65 kVA 発電機の冷却水・排気熱			28	522 kJ 1430 //日 50 //人日	貯水量を 6 kJ 以下にして投げ込みヒーターは使用せず
11	1970-1971	65 kVA 45 kVA	第一ダム 荒金ダム	65 kVA 発電機排気熱 45 kVA 発電機排気熱	130 kJ 水槽新設 (コルゲートにターボリンシート張り)	荒金ダムと貯水タンク間に送水ラインを設置 (145 m)、水中ポンプで送水。5月以降はヒーターを設置、12月まで送水した。130 kJ 水槽と 10 kJ 水槽間 (70 m) をビニールホースで連結	30	533.3 kJ 1485 //日 48.7 //人日	給水車の使用はなくなった。冬期間の雪入れもなくなった。荒金ダムの水位測定データあり
12	1971-1972	65 kVA 45 kVA	荒金ダム (通年)	65 kVA 発電機排気熱 45 kVA 発電機排気熱		断熱送水パイプを新設。口径 1 インチの断熱パイプを 2 kW の温床線とともに架橋上に設置した。長さ 100 m。荒金ダム上に小屋を設置。2 kW ヒーターを	29	364.3 kJ 38.4 //人日	塩害による設備のトラブル (凍結のため)

隊次	越冬期間	発電機	水源	造水熱源	造水槽	屋外配管	越冬 隊員	年間造水量	特記事項
						入れる。送水後の水切り悪くパイプ凍結			
13	1972-1973	65 kVA 45 kVA	10 k/水槽に毎日雪入れ	65 kVA 発電機 排気熱 45 kVA 発電機 排気熱	排気熱交換器(二次)を新設	送水ホースは1インチ断熱耐寒ホースと1/2インチポリエチレンホースの2種類。1インチホースは流速が遅く、凍結を招く	30	588 kJ 53.7 // 人日	荒金ダム～130 k/水槽間のホースは、2種類1インチ耐寒ホースと1/2インチポリエチレンホース
14	1973-1974	65 kVA 45 kVA	第一ダムからの送水は4月19日が最後。12月24日に再開。それ以外は10 k/水槽に雪入れ	65 kVA 発電機の排気熱と45 kVA 発電機の排気熱 排気熱交換器の煤をブリザードで除去	10 k/水槽外壁に150 mmの断熱材	第一ダムより送水: 50 mm パイプを300 m 展開し、途中にブースターポンプと加熱器を入れた。4月中旬で打ち切り	30	582.7 kJ 53.2 // 人日	排気熱交換器の煤取りで2.5倍に性能アップ
15	1974-1975	65 kVA 45 kVA	4月まで第一ダムから送水。6-12月まで水取りを週2回2台の檣で実施	65 kVA 発電機 排気熱 45 kVA 発電機 排気熱	環境科学棟に送水		30	473.3 kJ 43.2 // 人日	
16	1975-1976	65 kVA 45 kVA	4月まで第一ダムから送水。6-12月まで水取りを週2回2台の檣で実施。補助的にドリフトの雪入れ(毎日)。建設用デッキプレートを使用し直接檣に流し込んだ	65 kVA 発電機 排気熱 45 kVA 発電機 排気熱	65 kVA 1号機の排気熱交換器を交換。10 k/水槽ターボリンシートを交換		30	472.5 kJ 43.2 // 人日	氷山から檣へのデッキプレートを使用する
17	1976-1977	65 kVA 45 kVA		65 kVA 発電機 排気熱 45 kVA 発電機 排気熱	130 k/水槽への給水は3月中旬まで。10 k/水槽へは4-11月まで毎日30分間雪入れ		29	818.6 kJ 77.3 // 人日	
18	1977-1978	65 kVA 45 kVA	4月1日～12月8日まで10 k/水槽に毎日雪および氷入れを実施。1日約1k/を造水	65 kVA 発電機 排気熱 45 kVA 発電機 排気熱	第一ダムからの送水は3月25日まで。荒金ダムが一部決壊しているため水位が低下している		30	452.1 kJ 41.3 // 人日	
19	1978-1979	115 kVA	第一ダムからの取水は3月末までとし、以降はすべて雪入れ。氷山氷は、飲料水、	110 kVA の冷却水熱 130 k/水槽は排気熱を利用し、通年運用した	110 kVA 1台の運用		30	564.3 kJ 51.5 // 人日	

隊次	越冬期間	発電機	水源	造水熱源	造水槽	屋外配管	越冬 隊員	年間造水量	特記事項
			暗室、環境科学棟のみで使用						
20	1979-1980	115 kVA	4月12日～11月15日まで10 k/水槽への氷入れ	130 k/水槽は排気熱交換器で、10 k/水槽は冷却水熱交換器で循環	125 kVA と 110 kVA の 2 台体制 45 kVA を完全停止		30	482 k/ 44.0 //人日	
21	1980-1981	115 kVA	第一ダムは 5 月初旬まで使用。11 月までは週 2 回の氷取り (2 t 機 4 台)	125 kVA 1 基運転で冷却水熱と排気熱	直管型排気熱交換器を 2 台設置。10 k/水槽に 80 mm の断熱材を入れた。第一ダムにポンプ小屋設置。夜間 3 kW のヒーターを入れた		33	625 k/ 51.9 //人日	
22	1981-1982	125 kVA	4月18日まで給水車で 10 k/水槽へ、4月初旬に第一ダムから 130 k/水槽へ。それ以降 11月中旬まで氷取り	125 kVA 1 基運転で冷却水熱と排気熱			34	605.1 k/ 48.8 //人日	
23	1982-1983	125 kVA	3 月中旬まで第一ダムより取水し、100 k/水槽に入れる。それ以降 12 月初旬まで週 1 回の氷山水取り。第一ダムの水が配管腐食の原因になっている	125 kVA 1 基運転で冷却水熱 (10 k/水槽) と排気熱 (100 k/水槽)	130 k/水槽を撤去し、100 k/水槽を組み立てた。水温は 18-32℃、強風対策として屋根部シート上に道板と石を載せた		34	462 k/ 37.2 //人日	
24	1983-1984	125 kVA	3 月中旬まで第一ダムより取水し、100 k/水槽に入れる。それ以降 12 月初旬までの氷取り	125 kVA 1 基運転で冷却水熱と排気熱			35	523.4 k/ 41//人日	エンジン冷却水には氷山水を使用した。直管型排気熱交換器は 1500 時間ごとにカーボン落としを実施
25	1984-1985	200 kVA	第一ダムからの取水は 3 月 20 日で終了。ほかは降雪とブルによる雪入れで氷山水取りは実施せず。12 月 17 日に取水を再開	冷却水熱	100 k/水槽に熱交換器を入れ、130 k/水槽への熱供給を計画したが、容量が足りなく、100 k/水槽が高温、130 k/水槽が低温になった。100 k/水槽に直接雪入れで両水槽の温度差を調整した		35	896.29 k/ 70.2 //人日	脱塩装置を使用。最悪のとき 400 μs/cm (国内基準は 600 μs/cm)
26	1985-1986	200 kVA	ブリザードの自然方式、ブ	冷却水熱	100 k/、130 k/水槽の熱交		35	712 k/ 55.7 //人日	ブリザードによる 130 k/

隊次	越冬期間	発電機	水源	造水熱源	造水槽	屋外配管	越冬隊員	年間造水量	特記事項
			ルによる機械方式、壁のドリフトの3種で確保。雪不足で、4・5月は水櫃で荒金ダムより牽引、5・6月は氷山水を牽引した	125 kVA の排気熱交換器を増設し、130 kJ 水槽の融雪能力向上を図った	換器を交換したが、100 kJ 水槽の水温上昇が起きた				水槽の水位管理は難しい。新設ピット内が浸水。第一ダムの最深部 0.8 m、荒金ダムの最深部は 1.6 m
27	1986-1987	200 kVA	氷山取りはなし。130 kJ 水槽には、自然方式、プルによる機械方式、壁のドリフトで雪入れ。濃縮水を風呂・洗濯等の雑用水として利用したが、配管に悪影響あり。塩分濃度は 2900 $\mu\text{s}/\text{cm}$ だった (5月)	冷却水熱	荒金ダム温水循環用熱交換器を 100 kJ 水槽内に新設	100 kJ 水槽内に熱交換器を設置し、荒金ダム温水循環配管を構築した。荒金ダム取水口の水中ポンプで常時循環する。ボールタップにより 100 kJ 水槽に給水される	35	656.3 kJ 51.4 // 人日	大腸菌を検出、次亜塩素酸ナトリウムを注入。濃縮水の利用として風呂、洗濯用として利用した。塩分濃度は、2900 $\mu\text{s}/\text{cm}$
28	1987-1988	200 kVA	8 月中旬まで荒金ダムを利用、その後は 130 kJ 水槽への雪入れ (週 3 回 20 分間)。氷山取りはなし	冷却水熱	100 kJ 水槽から荒金ダムまでのラックを新設、循環回路を設けた。取水口は水深 2 m、2 月中旬より凍結し、4 月下旬には氷厚 70 cm になる		37	1049.7 kJ 77.7 // 人日	強度のある取水口必要。130 kJ 水槽の傾きが目立つ
29	1988-1989	200 kVA		冷却水熱	荒金ダム循環ポンプの電源配線が断線し配管凍結、ヒーター付き配管と交換した		37	1156.5 kJ 77.7 // 人日	
30	1989-1990	200 kVA	雪不足のため、第 29 次隊との引き継ぎ時に、みどり池から第一ダムへ送水、3 月初旬に第一ダムから荒金ダムへ送水。5、6、7、9 月に月 2 回約 30 kJ ずつ荒金ダムから送水した。ほかには雪入れ	冷却水熱	荒金ダム：3 月に凍結。3 月初旬 10 cm、3 月中旬 20 cm、5 月中旬 70-80 cm、それ以降 1 m 以上		37	970.4 kJ 71.9 // 人日	荒金ダム架台を単管パイプから H 鋼・電線ラック廃材で設置。ダムの水温センサー取り付け。入浴・洗濯は毎日、制限設けず。130 kJ 水槽上部破損漏水修理
31	1990-1991	200 kVA (ときどき並列運転)	ほとんど荒金ダムより、130 kJ 水槽への雪入れは 1 回のみ	冷却水熱	荒金ダムのケーブルラックが積雪で破損、復旧し第 32 次隊へ引き継いだ		38	1165.2 kJ 84 // 人日	濃縮水を洗濯水として利用した

隊次	越冬期間	発電機	水源	造水熱源	造水槽	屋外配管	越冬隊員	年間造水量	特記事項
32	1991-1992	200 kVA (単基運転)	4 月初めまで荒金ダムより送水。その後は自然造水、パワーショベルでの雪入れで年間対処した	冷却水熱	大幅にシステムを変更、荒金ダムと130 k/水槽用熱交換器を新設し熱交換器小屋に収納した		39	1232.04 k/ 86.6 //人日	あすか越冬分を考慮せず
33	1992-1993	200 kVA (単基運転)	5 月初旬まで荒金ダムからの送水 4 月より雪入れ、8 月下旬から荒金ダムからの取水を適宜行う	冷却水熱	4 月中旬 130 k/水槽配管凍結 2.5 日間休止。2 月初めに、6 m にわたり荒金ダムが決壊し、修復。配管用ケーブルラックが変形、夏でも雪に覆われている		37	1222 k/ 90.5 //人日 中水: 230.7 k/ 17.1 //人日	熱交換器の汚れがひどい。荒金ダム: 泥、130 k/水槽: 異物
34	1993-1994	200 kVA (ときどき並列運転)	荒金ダムからの給水と冬期の雪入れ	冷却水熱	7 月より配管ラックが埋没した。水槽表面凍結時には 6 kW シーズヒーターによる融氷の実施		39	1515 k/ 106.5 //人日	
35	1994-1995	200 kVA (ときどき並列運転)	夏期間は荒金ダムより、冬期は雪入れ	冷却水熱	4 月末よりラックが埋没		40	1190.5 k/ 81.5 //人日	2 月末から濃縮水を 100 k/水槽に戻したが良好な水質だった
36	1995-1996	200 kVA (ときどき並列運転)	夏期間は荒金ダムより、冬期は雪入れ	冷却水熱	雪が多くラックは 1 年間埋没		40	1029 k/ 70.5 //人日	熱交換器プレートに異物。新脱塩装置の設置。ドーム越冬考慮せず
37	1996-1997	300 kVA	5 月までは荒金ダム、それ以降は雪入れ	冷却水熱	6 月に取水ポンプのブレーカトリップによりラインが凍結、1997 年 1 月中旬に復旧した		40	1553 k/ 106.4 //人日	
38	1997-1998	300 kVA	7 月 24 日までは荒金ダム、その後は雪入れ	冷却水熱	7 月 24 日にゴムホースが破れ凍結、11 月 26 日に復旧した		40	942.8 k/ 64.6 //人日	雪入れに重機は使わず、人力で行う
39	1998-1999	300 kVA 太陽光 20 kW	荒金ダムと雪入れ	冷却水熱	荒金ダムは 8 月に取水ポンプまわりが凍結したので中止、復旧は 11 月末		40	1032 k/ 70.7 //人日	
40	1999-2000	300 kVA 太陽光 30 kW	荒金ダムと雪入れ	冷却水熱	6 月末に荒金ダムラインが凍結、12 月初旬に復旧した		40	1388.8 k/ 95.1 //人日	

隊次	越冬期間	発電機	水源	造水熱源	造水槽	屋外配管	越冬 隊員	年間造水量	特記事項
41	2000-2001	300 kVA 太陽光 40 kW	荒金ダムと 5 月より雪入れ	冷却水熱			40	1038 kJ 71.1 //人日	
42	2001-2002	300 kVA 太陽光 40 kW	荒金ダムと 4 月上旬より雪 入れ	冷却水熱	荒金ダムは 夏期にオー バーフロー となるため 堤防改修が 必要		40	1679.3 kJ 115 //人日 中水: 587.7 kJ 40.3 //人日	熱交換器小 屋のドリフ トが問題
43	2002-2003	300 kVA 太陽光 55 kW	荒金ダムと雪 入れ	冷却水熱	荒金ダムの ラインをミ ニサーモで 更新した。取 水口配管架 台と水中ポ ンプを更新 した		40	1733.2 kJ 118.7 //人日 中水: 1600.9 kJ 109.7 //人日	荒金ダム循 環配管更新 にともない 熱交換器小 屋が不要に なった
44	2003-2004	300 kVA 50 kVA (NHK 放送) 太陽光 55 kW	荒金ダムと雪 入れ	冷却水熱	荒金ダムに 決壊が起き ている。130 kJ 水槽に砂 塵が入りや すい		44	1976 kJ 135.3 //人日 中水: 652.6 kJ 44.7 //人日	濃縮水を 100 kJ 水槽から 荒金ダムラ インに戻す よう変更し た。NHK オ ブザーパー 4 人越冬
45	2004-2005	300 kVA 太陽光 55 kW	荒金ダムと雪 入れ	冷却水熱	荒金ダム循 環ライン熱 交換器の汚 れがひどい		42	2072.7 kJ 142 //人日 中水: 865.6 kJ 59.3 //人日	朝日新聞 2 人 越冬
46	2005-2006	300 kVA 太陽光 55 kW	荒金ダムと雪 入れ	冷却水熱	夏期に護岸 工事を実施		37	1587.9 kJ 117.6 //人日 中水: 679.3 kJ 50.3 //人日	130 kJ 水槽の ポンプヤス トレーナー の目詰まり がブリのと きに起きる ので、表面 は雪があっ たほうがよい
47	2006-2007	300 kVA 太陽光 55 kW	ほとんど荒金 ダムより。130 kJ 水槽への雪 入れは 2 回 のみ	冷却水熱	荒金ダムの 塩分は、 0.08%なので 腐食が激し く穴があい た。冬明けに ポンプ架台 が壊れてい た		37	上水: 1362 kJ 中水: 478 kJ	
48	2007-2008	300 kVA 太陽光 55 kW	荒金ダムと雪 入れ	冷却水熱	荒金ダムの 水位が9月に 濁水寸前ま で下がった		35	上水: 1836 kJ 中水: 708 kJ	
49	2008-2009	300 kVA 太陽光 55 kW	荒金ダムと雪 入れ	冷却水熱	荒金ダムは 11月に砂塵 の吸い込み が激しく、ス クリーンな して運用し た。130 kJ 水 槽の傾きで、 床下浸水の 危険がある		29	上水: 1455kJ 中水: 555 kJ	
50	2009-2010	300 kVA 太陽光 55 kW	荒金ダムと雪 入れ	冷却水熱	荒金ダムは 2月に砂塵が 多く、検水器 の誤動作が 頻発した。		28	上水: 1341 kJ 中水: 574 kJ	荒金ダムに ポンプビッ ト、ビット内 融雪装置等 を設置する

隊次	越冬期間	発電機	水源	造水熱源	造水槽	屋外配管	越冬隊員	年間造水量	特記事項
					130 kJ 水槽も底に砂塵が溜まり、荒天時に巻き上がり「発電棟循環ポンプ停止」が頻発した				のが望ましい
51	2010-2011	300 kVA 太陽光 55 kW	荒金ダムと雪入れ	冷却水熱	荒金ダムは3月に砂塵が多く、検水器の誤動作が頻発した。130 kJ 水槽のストレーナーは月1回清掃した		28	上水: 1130 kJ 中水: 579 kJ	荒金ダムの吐出口を確認するのは危険
52	2011-2012	300 kVA 太陽光 55 kW	荒金ダムと雪入れ	冷却水熱	荒金ダムは3月に砂塵の吸い込みがひどく、検水器が発報した		30	上水: 1573 kJ 中水: 706 kJ	荒金ダムの吐出口を確認するのは危険
53	2012-2013	300 kVA 太陽光 55 kW	荒金ダムと雪入れ	冷却水熱	8月に荒金ダムの熱交換器プレートを交換した。また、多雪で取水口付近は目視観察ができない		30	上水: 1854 kJ 中水: 685 kJ	中水は発電棟トイレ、洗濯機、浴室で使用。着雪による配管変形防止を考慮すべき
54	2013-2014	300 kVA 太陽光 55 kW	荒金ダムと雪入れ	冷却水熱			30	上水: 1413 kJ 中水: 635 kJ	荒金ダム循環ラインの熱交換器プレートを交換

付録 2 水の塩分濃度、塩素イオン濃度および電気伝導率

Appendix 2. Salt concentration, chloride ion concentration and electric conductivity of water.

一般の海水 1 kg には約 35 g の塩分が含まれている。この海水の主要成分濃度は、塩素イオン (19.35 g/kg)、ナトリウムイオン (10.77 g/kg)、硫酸イオン (2.71 g/kg)、マグネシウムイオン (1.29 g/kg) などである。これらの組成が一定であることから塩素イオンの濃度を測定し、約 1.8 倍すれば塩分となる (海のはなし編集グループ, 1984)。一方、水の電気伝導率は、水に溶解する無機塩類の量におおむね比例するため、水質を判断する指標として用いられる。様々な水の電気伝導率は以下の表のとおりである (アクアス株式会社, 2014)。

電気伝導率 ($\mu\text{S/m}$)	抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	水の種類
0.05	18 M	超純水
1	1 M	蒸留水
10	100 k	RO (逆浸透膜) 水
100	10 k	水道水
50000	20	海水

付録 3 排気ガス熱交換器の腐食と硫黄分の多い軽油

Appendix 3. Corrosion of exhaust-gas heat exchanger and sulfur-rich light fuel.

ディーゼルエンジンの燃料である軽油には、0.4%の硫黄が含まれている。そのため排気ガスにも0.025%のSO₂を含み、そのうちの3%がSO₃になる。熱交換器を通った排気ガスの出口温度は50–55℃まで冷やされる。また、コイル内には冷水が通る。そのため、排ガス中のSO₃が露点以下の温度でコイル表面に硫酸となって付着し、ステンレスのコイルは著しく腐食する (Awano *et al.*, 1982)。これを防ぐためには、熱交換器出口の排気温度を100–150℃以下に保つ必要がある (Awano and Takeuchi, 1985)。このため、第25次隊から使用を開始した新200kVA発電機システムでは、これまで行ってきた排気ガス熱の積極的な利用はやめて、発電棟室内の空気を暖めるのみとした。ヒートパイプ方式の排気ガス・空気熱交換器を設置したが、回収熱量は排気保有熱量の3.9%に過ぎなかった。その後、発電棟室内は、エンジンのからの廃熱で充分室温が高いことなどから、排気ガスの積極的な利用はしばらく行われなかった。

我が国では2007年から軽油の硫黄分を10ppm (0.0010%)以下の規制するサルファーフリー化が実施され、排ガス中の硫黄酸化物の排出は著しく改善された。昭和基地で発電機用として使用している軽油は主に特3号軽油で、たとえば第26次隊 (1984–1986)で納入したものには0.33% (重量%)の硫黄が含まれていた。しかし、第55次隊 (2013–2015)納入のものでは0.0009%に改善されている。排気ガスの利用が再開されたのは、第40次隊が設置した排ガス・温水熱交換器 (いわゆる排ガスボイラー) からで、回収された熱は、居住棟などの温水暖房として利用されている (国立極地研究所, 2000)。

付録 4 氷の融解熱量

Appendix 4. Melting heat of ice block.

昭和基地で使用する生活水の量は、中水も含めて第53次隊で232//人・日となっている。現在の日本の使用量である300//人・日になったとしても、現在の越冬隊員30人の規模なら、10t/日製造できれば十分である。そこで、+5℃で10t/日の生活水を得るために必要な熱量を、氷を融解する場合と、海水を昇温する場合について計算する。以下の数値を仮定する。

水の重量 (M): 10000 kg

水の比熱 (C_w): 4.184 kJ/kg · K

海水の比熱 (C_s): 4.00 kJ/kg · K

氷の比熱 (C_i): 2.10 kJ/kg · K

氷の融解潜熱 (H_i): 334.72 kJ/kg

氷の温度 (T_i): -20℃

海水の温度 (T_s): -2℃

-20℃の氷10000 kgを+5℃の水にするために必要な熱量 Q₁は、

$$\begin{aligned} Q1 &= MC_i \Delta T + M H_i + MC_w \Delta T \\ &= 10000 \times 2.10 \times 20 + 10000 \times 334.72 + 10000 \times 4.184 \times 5 \\ &= 3976.4 \text{ MJ.} \end{aligned}$$

一方、半量が濃縮水として排出されることを考慮して、 -2°C の海水 20000 kg を $+5^{\circ}\text{C}$ まで昇温するのに要する熱量 $Q2$ は、以下となる。

$$Q2 = MC_s \Delta T = 20000 \times 4.00 \times 7 = 560 \text{ MJ.}$$
