

掘削地形を利用した半地下式冷凍倉庫の利用 A STUDY ON UTILIZATION OF SEMI-UNDERGROUND FACILITY FOR FREEZING WAREHOUSE AT OPEN CUT SPACE

来山 尚義¹・近久 博志²・田頭 正昭³

Naoyoshi KITAYAMA・Hiroshi CHIKAHISA・Masaaki TAGASHIRA

The internal environmental characteristic of underground opening is superior to overground buildings, such as the insulation characteristic from external climate fluctuation, an electromagnetic wave and radioactivity, constant temperature and humidity, an air-tightness and a low vibratility.

However, in spite of many needs faced here and there, reuse plans of underground openings were conducted for fewer purposes in Japan than in other foreign countries.

As one example, a freezing warehouse was planned and its cost of construction and electricity consumption is examined in this paper. And the merits of utilizing underground opening are examined by comparing the cost and the effectiveness on the construction on land. Finally the possibility of reuse of underground opening is discussed.

Key Words : semi-underground opening, reuse plan, freezing warehouse, industrial heritages, internal characteristic, heat conduction problem, latent heat

1. はじめに

地下空間は，外部との遮断性（気候変動，電磁波，放射能などからの遮断），恒温恒湿性，気密性，遮音性，低振動性などの内部環境特性に優れている．このため，これまで駐車場や駐輪場，地下街の他，スポーツ施設，発電所，備蓄基地，熱供給施設，貯蔵庫，博物館など，様々な利用が行われている¹⁾．また，2000年5月には「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」（平成12年法律第87号，2001年4月1日施行）が成立し，通常使用されることのない「大深度地下」について，原則として事前の補償を行うことなく，公共の目的のために使用できる特別の手続きが定められている²⁾．

今回，山地を切り開いて造成した産業団地内にある，掘削底面約160m×約60m，掘削深さ約30mのいわゆる“すり鉢状”の形状をした遊休地の有効利用策について概略検討を行った．ここでは，まず，対象地に建設可能と考えられる施設を挙げ，それぞれ地理的・地形的特性，内部環境特性，構造特性，心理特性などの地下空間としての特性などについて比較検討を行った．そして，冷凍倉庫のように一定温度を維持する必要がある施設を建設した場合，周辺を地盤で囲われて冷氣漏れや熱供給が少なくなるため，運転コストの低減に繋がりがやすくなる．このため，半地下式ではあるが，冷凍倉庫を建設する場合の施設配置計画を立案し，建設費および電力費についての試算を通じて，地上に建設する場合と地下に建設する場合の優劣について検討を行った．

キーワード：地下空間利用，跡地利用，冷凍倉庫，産業遺産の再利用

1 正会員 復建調査設計株式会社 技術研究所所長

2 フェロー会員 山口大学 イノベーション推進機構 教授

3 非会員 復建調査設計株式会社 建築室室長

表-1 利活用方法に関する評価結果一覧表

		展示施設	集会研修施設	スポーツ施設	防災施設	倉庫施設	教育研究施設	製造・処理施設	インフラ施設							
		展示館	美術館 集会場・研修所	劇場 音楽ホール	(温水)プール アイスアリーナ	低圧低酸素トレーニング施設	高圧高酸素施設 メンテナンス・トレーニング施設	防災センター コンピュータ・バックアップセンター	冷凍倉庫 食品・ワイン倉庫	重要物保管倉庫 貯蔵庫	精密機械工作室 特殊研究室 特殊実験室	精密工場 顧客・特殊工場	野菜工場 下水処理場 ゴミ処理場	蓄冷冷施設	地域冷暖房施設	上下水道 通信
内部環境特性	遮断性	◎	◎	○	○	○	○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	気候変動の影響を受け難い	◎	◎	○	○	○	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	電磁波や放射能を遮断しやすい	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	恒湿恒湿性	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	気密性	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
遮断性	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
気密性	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
遮断性	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
低振動性	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
構造特性	土地の有効利用	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	自然環境保全	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	景観保全	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	頑強な構造	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	地震等に対して安定が高い	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	自由な空間配置	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
心理特性	非日常性	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	神秘性	◎	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
その他	交通の利便性がよい	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	当地区への適応性	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
総合評価		◎	◎					◎	◎	◎	◎	◎				

注) 総合評価は、当地区への適応性があると判断した利活用方法のうちから、○(1点)、●(3点)として総合点の高いものから3位までの順位を付けた

2. 地理的特性・地質特性

建設対象地域は、都市の中心部に近く、地下鉄など公共交通機関による移動性に優れ、さらに高速道路のインターチェンジに隣接しているため、高い物流機能、集客機能などを有している場所とした。また、当地区の地質特性は、地表面より掘削底面までCL～CM級の第三期中新世の凝灰岩層、泥岩、礫岩、砂岩の互層であり、南東から北西方向に約5度で緩やかに傾斜しているような地形を想定した。

3. 利活用方法の絞り込み

ここでは、まず、当地区で対応可能と考えられる利活用形態を列挙し、それぞれの形態について内部環境特性、構造特性、心理特性などの適用性を評価した。表-1に比較検討結果を一覧表にして示す。今回の検討では、展示館や美術館などの展示施設、食品・ワイン倉庫、重要物保管倉庫、貯蔵庫、コンピュータ・バックアップセンター、冷凍倉庫などに利用する場合の評価が高くなった。なかでも、冷凍倉庫は、下記のような特徴を有することから当地区への適用性が高いと考えられた。

- ① 地下空間は気候変動の影響が少ないために熱効率が高く、地上に建設する場合に比較して冷凍施設を維持するための電力削減が期待できること。
- ② 自動倉庫の場合は入出荷のためのトラックが接続する入出荷スペースを地上部に設けることで、倉庫の周囲を土砂等で埋め戻すことができ、さらに高い熱効率が期待できること。
- ③ 主要部分を、すでに掘削されている地中部に納めることができるため地上部を有効に利用できること。
- ④ インターチェンジに近いことから商品の輸送が便利であること。
- ⑤ 周辺の流通量を考慮すると妥当な施設規模であること。

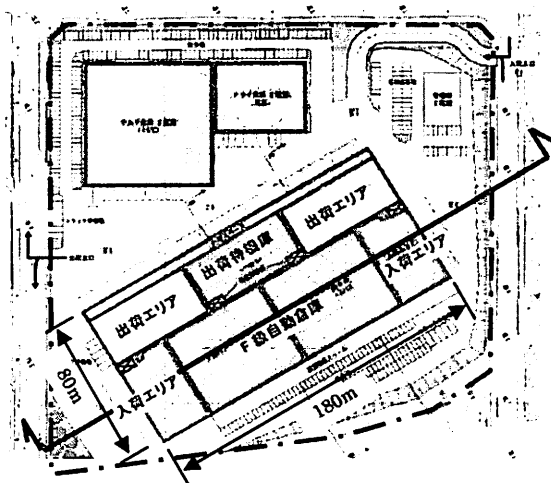


図-1 平面図（半地下方式）

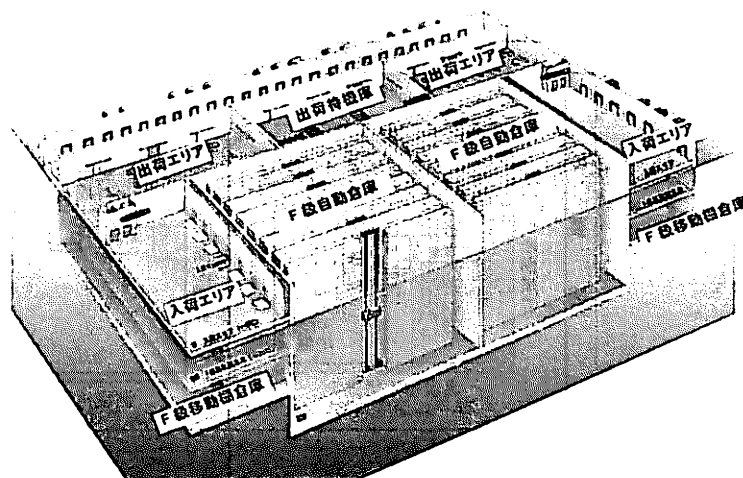


図-3 パース図（半地下方式）



図-2 断面図（半地下方式）

4. 施設配置計画

冷凍倉庫の施設は、取扱量や種類によって大きく異なる。現段階ではこれらの条件が決定していないため、冷凍倉庫の規模および配置は、以下の条件で計画した。

- ・施設の規模は、地形を最大限有効利用できるように可能な限り大きくする。
- ・倉庫はF級冷凍自動倉庫を想定する。
- ・貨物トラックは、地表面から入出荷する。
- ・入出荷のための入荷エリア、出荷待機庫および出荷エリアをF級冷凍自動倉庫の周辺に配置する。
- ・地形を最大限有効利用するため、入荷エリアの下層階にF級移動棚倉庫を配置する。

計画した施設は、地下3階、地上1階建て、建築面積約9,500m²、延べ床面積約62,000m²（自動倉庫部分を5層の仮想床として計算）である。

図-1に冷凍倉庫の平面図を、図-2に断面図を、図-3にパース図を示す。なお、冷凍倉庫の熱効率を高めるため、倉庫周辺は土砂で埋め戻しを行うこととした。

5. 冷凍倉庫供用時の熱効率の検討

冷凍倉庫の運転中の熱効率を比較検討するために、10×10mの矩形断面の冷凍庫を地下、半地下、地上に設置した場合を想定して、運転後10年間の温度変化と熱損失について地盤の潜熱を考慮した熱伝導解析³⁾を実施した。

- 1) ケース1（地下式冷凍倉庫）・・・冷凍庫を土被り10mの地下に設置
- 2) ケース2（半地下式冷凍倉庫）・・・天井が地表レベルになるように冷凍庫を設置
- 3) ケース3（地上式冷凍倉庫）・・・冷凍庫を地上に設置

図-4より、冬場の熱損失速度は各ケースとも大きな違いは見られないが、夏場は高い外気温の影響を受けている様子が分かる。冬場は、どのケースも同程度の値を示しているが、熱損失が大きくなる夏場の熱損失速度は、供用開始10年後では、地上式に比べて、半地下式73%、地下式63%程度になっている。一方、供用開始後10年間の総熱損失量は、地上式に比べて、半地下式90%、地下式86%となっており、当初、地下式や半地下式では周辺

表-2 冷凍倉庫の設置位置による熱損失の検討のための解析ケース

	ケース1 (地下式冷凍庫)	ケース2 (半地下式冷凍庫)	ケース3 (地上式冷凍庫)
概略図			
概説	土被り 10mの地下に冷凍庫を設置する	天井部を地表面に合わせて冷凍庫を設置する	地上部に冷凍庫を設置する

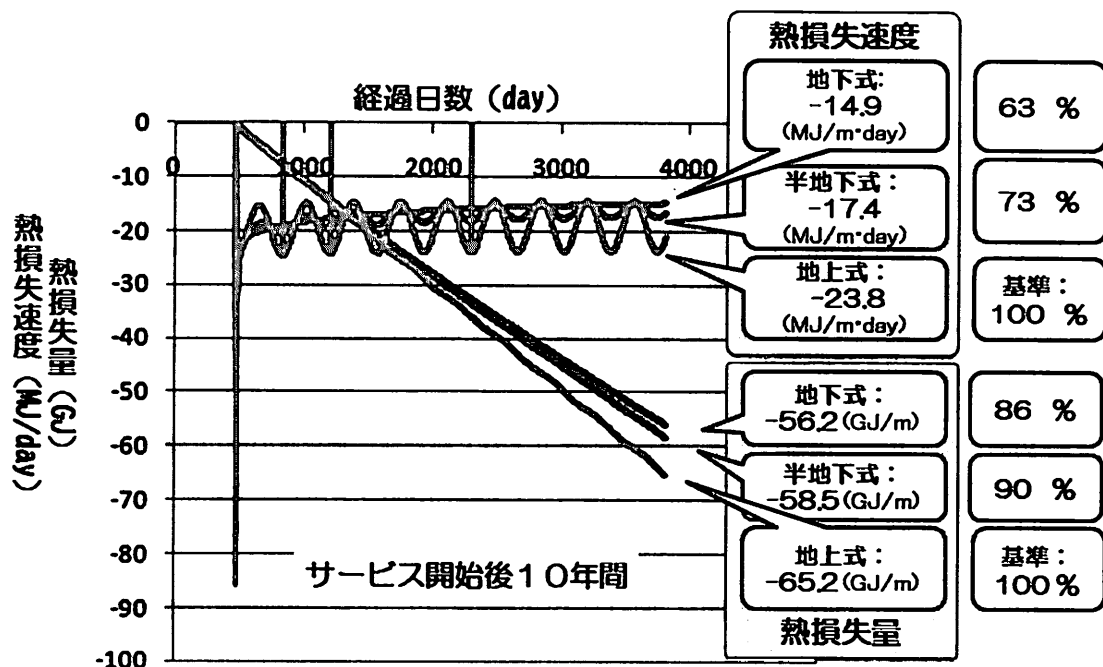


図-4 各ケースにおける供用開始後10年間の熱損失量の変化

地盤を冷やすための損失熱量が大きくなっているが、次第に、冬場の地上部の損失と同じ程度の値に収束するようである。また、本解析では、冷凍庫周辺に ALC 版 (厚さ 20cm) を設けることを想定しているが、断熱方式の違いや現地の地盤条件によって大きく異なってくるものの、概ね、地下や半地下に冷凍庫を設置することによって、地上に比べて、少なくとも 10% 程度の熱損失を低減できることが分かった。

6. 冷凍倉庫建設費および維持管理費 (電気料金) の試算

4 で計画した半地下式冷凍倉庫の建設費および維持管理費 (電気料金) について試算を行い、同等の施設を地上に建設した場合との比較を行った。

表-3 地上式と半地下式の施設建設費の割合

	地上式	半地下式	備 考
土木費	25	11	埋め戻し、基礎杭など
建築工事費	75	76	躯体（S造、一部RC造）
計	100	87	土木費+建築工事費

(*地上式の計を100とした場合)

(1) 施設建設費

施設の建設費としては、主に、土地取得費、土木工事費（埋め戻し費、基礎工事費など）、建築工事費、設備費（冷凍設備：冷凍機パネル、冷凍庫など、冷凍倉庫施設：冷凍自動倉庫、垂直搬送機など）が挙げられる。これらのうち、土地取得費および設備費は、半地下式と地上式で変わらないものと考えた。表-3 は施設建設費（土木工事費および建築工事費）について、地上式の合計を100とした場合のそれぞれの割合を示したものである。

実際の計画においては詳細な検討が必要であるが、今回の試算では、表-3 に示したように、地上方式の土木費は、埋め戻し量が多くかつ基礎杭が必要であることから、半地下方式に比べて高価になる。一方、建築工事費は若干半地下方式の方が高くなるが、これらの費用を合計した半地下方式の施設建設費用は、地上方式に比べて10%強減少することが分かった。

(2) 維持管理費（電気料金）

前述のように、半地下式で建設した場合の熱損失は、地上式で建設した場合より約10%低減できる試算結果となった。そこで、原価償却資産の耐用年数⁴⁾である21年間（鉄骨鉄筋コンクリート造又は鉄筋コンクリート造のもの、冷蔵倉庫用のもの）の維持管理費（電気料金）の試算を行った。

試算は、冷凍機メーカーへのヒアリング結果あるいは同等の施設での実績などより、地上に建設した場合の冷凍関連機器の使用電気量を仮定し、半地下式で建設した場合は熱損失と同じ割合で電気量が削減できると仮定して電気料金を求めた。その結果、4で計画した規模の冷凍倉庫の冷凍施設の維持に必要な電気量は、半地下式の方が地上式より1割程度少なく、1年間で約700万円、21年間で約1.5億円の電気料金の削減が期待できる試算結果となった。

この量は二酸化炭素削減量とも等しく、電気事業者からの排出係数を $0.378\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ ⁵⁾とすると、1年間で約265トン、21年間で約5600トンの削減となる。

なお、冷凍倉庫を維持していくためには、自動冷凍倉庫内移動装置、エレベータ、ベルトコンベア、あるいは管理事務所などでも電力も必要であるが、ここでは、地上に建設した場合と同等と仮定した。

7. まとめおよび課題

いわゆる“すり鉢状”の形状をした遊休地を有効利用するために、半地下式冷凍倉庫の施設配置計画を行い、熱損失量、建設費、維持管理（電力使用料）などについて試算を行って、半地下式で建設する場合のメリットについて概略検討を行った。

その結果、当地区を埋め戻して冷凍倉庫を建設する場合に比べて、10%強の施設建設費（土木工事費+建築工事費）削減が見込まれた。また、半地下式で建設する場合の熱損失量は、地上に建設する場合に比べて約90%であり、使用する電力は1年間で700kW程度、施設の原価償却試算の耐用年数である21年間では約15000kwh（二酸化炭素削減量：約5,600トン）の電力削減が期待できる。そして、その費用は約1.5億円と見込まれた。

このことから、従来地上部に建設されてきた冷凍倉庫を地中に建設すると、熱効率が高いことから、運転中の空調設備に係る電気料金と建設費を削減できる可能性が大きいことがわかった。

また、一般倉庫として利用する場合は多層階とすることになるが、地上に建設する場合はトラックが各階毎に直接乗り入れるためのランプウェイと搬入出エリアが必要になる。この場合、重量物を満載した車両往来のために、しっかりとした構造にする必要があり、高価になりがちである。しかしながら、当地区では、図-5に示したよう

に、立体的な地盤構造をうまく活用して、車両往来や搬入出エリアを地盤の上に設けることにより、トラックなどの重車両の輪荷重が建築構造物としての建屋に作用しないようにすることができ、構造物としての費用軽減に繋がることになると考えている。

なお、本検討は他地区において地上に建設した冷凍倉庫の実績をもとに概略の試算を行ったものであり、実際の計画にあたっては詳細な費用等の検討が必要であるとともに、地下水処理などいくつか解決すべき課題もある。しかしながら、地下式冷凍倉庫の熱効率が不利になる大規模な冷凍倉庫を想定しても、地下式の方が有利な施設になることを示すことが出来たと考えている。こうした研究が、今後の同種の工事の参考になり、狭い国土の有効利用の一助になれば幸いである。

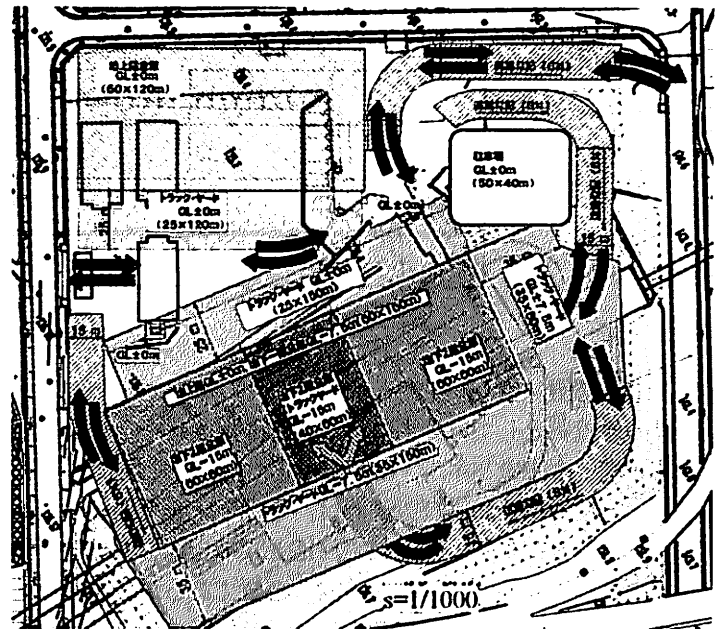


図-5 ランプウェイ方式の多層階倉庫

謝辞:本研究を進めるに際して、財団法人建設工學研究所櫻井春輔理事長から示唆に富む多くの助言を頂きました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 地下開発利用研究センターホームページ
- 2) 国土交通省 「大深度地下利用に関する技術開発ビジョン」
- 3) 例えば 近久博志, 中原博隆, 松元和伸, 櫻井春輔: 逆解析手法を用いた冷凍地盤の熱特性の評価, 土木学会論文集 No.589/III-42, pp.67-77, 1998.3.
- 4) 減価償却資産の耐用年数等に関する省令(昭和40年3月31日大蔵省令第15号, 最終改正, 平成20年4月30日財務省令第32号)
- 5) 環境省地球環境局: 事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン(試案 ver1.6), 2003.7.