

熱負荷推定に基づいた大谷採石地下空間の 長期的な利用に関する検討

CONSIDERATION TO LONG-TERM USE OF UNDERGROUND SPACE FOR OYA TUFF UNDERGROUND MINE BASED ON ANALYZING HEAT LOAD

井上 達也^{1*}・早坂 晃²・阿部 友哉³・清木 隆文⁴

At Oya area, Utsunomiya City, Tochigi Prefecture, Oya tuff which is used for construction materials for many years is excavated at mine. After terminating excavation of Oya tuff, a lot of underground spaces for mining site was ruined. However, some of them are utilized. e.g. Oya stone museum was opened for sightseeing. Some of Oya underground spaces had been used for vegetable and fruit storage. The underground spaces for mining Oya tuff are regarded as space resources for infrastructures. And facilities at the underground space may be useful to reduce environmental impact rather than that on above ground while constructing and utilizing stage. This study focus on evaluating heat conductivity and environmental load at the facility in Oya tuff mine for long-term by numerical analyses. And the authors tried to clear utilizing advantage of the underground spaces based on environmental loads. The results show that the underground storages at Oya area are more useful than the above ground ones. And it is also clear that the long-term utilization of the storage has advantage in terms of reduction for amount of annual CO₂ emissions.

Key Words : Oya tuffi, heat load, underground space utilization

1. はじめに

(1) 研究背景

近年，大深度地下をはじめとする地下空間の利用が注目されている．この理由としては，都市部の土地不足があげられる．先進諸国が現在の速度で発展を維持すれば，都市部の過密化が進行し，深刻な問題となることは明らかである．地下空間の利用によって，都市の規模を現在のみととし，かつ，都市機能の向上を図ることが期待される．さらに近年，地球温暖化が進行しており，CO₂の削減をはじめとする環境負荷の低減が求められている¹⁾．そこで，地下空間が有する特性を活かすことで施設の建設や運用に要する環境負荷を低減し，環境にも配慮することができる．既存の地下空間を貴重な空間資源として捉え，種々の用途への利用が求められている．

(2) 研究目的

栃木県宇都宮市大谷地区では，古くから建築資材として用いられてきた大谷石の採石が盛んに行われている．しかしながら，大谷石採石後の採石跡地下空間の多くは放置され荒廃している．再利用されているのは，ごく一部であり，大谷地区には利用されていない地下空間が多

数存在している．これらの採石跡地下空間は貴重な空間資源であり，地下空間の有する特性をうまく利用することで，地上施設よりも環境負荷の低減を図ることが出来る．そこで，本研究では大谷採石地下空間を空間資源として有効的に利用することを前提とし，長期利用時に熱が大谷石に伝達する影響を踏まえて，地下空間内施設の温度環境と地下施設の熱負荷を推定し，大谷採石地下空間の有効利用を検討することを目的とする．

2. 栃木県宇都宮市大谷地区の概要

宇都宮市は，首都圏から約100kmに位置し，東北新幹線でJR東京駅から49分，東北自動車道で浦和ICから98kmと交通至便の地であり，古くから北関東エリアの中核都市として発展してきた．また，大谷石は，宇都宮市の中心から北西約7kmの大谷町付近に，北西に約2km，南西に約4kmにわたり，薄い緑色の凝灰岩として所々に露頭が見られる．採石地域は北西に約3km，南北に約6kmにわたって分布している．

キーワード：大谷石，熱伝導，地下空間利用

¹ 学生会員 宇都宮大学大学院 工学研究科（〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2），E-mail: mtl16422@cc.utsunomiya-u.ac.jp

² 学生会員 宇都宮大学 建設学科（〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2）

³ 非学生会員 宇都宮市役所（〒320-8540 栃木県宇都宮市旭1丁目1番5号）

⁴ 正会員 宇都宮大学大学院 工学研究科（〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2）

3. 検討対象地下空間概要

本研究において、地下施設の温度環境を推定するにあたり、現在も採石を行っている大谷地区の採石地下空間を地下施設を建設する対象地下空間に設定する。対象とした地下空間の平面図を図-1に示す。

4. 有効利用を検討する施設

(1) 貯蔵施設

貯蔵施設の貯蔵物として、食糧・飲料、エネルギー等があるが、ここでは食糧の貯蔵を想定する。食糧の貯蔵施設は、既往の研究によって検討され、貯蔵物によっては地上の貯蔵施設よりも地下空間を利用した貯蔵施設の方が有利とされている²⁸⁾。本研究では、貯蔵物として貯蔵温度の異なる、魚(冷凍)、ホウレンソウ、グレープフルーツの3種類を設定し、施設並びに施設周辺温度の推定に着目し、有効利用について再検討を行う。

5. 熱伝導解析

本研究は、解析ソフト(FLAC3D,Itasca社製)を用いて、熱伝導解析を行った。解析にはFLAC3Dの熱伝導解析を行うオプションを使用した解析を行った。

(1) 解析条件

a) 貯蔵施設

本研究では、検討対象とした大谷採石地下空間の測量データをもとに、FLAC3Dで地下空間を再現した。再現した地下空間から、空間の床面積や高さなどの空間的制限に応じて貯蔵施設として利用可能な範囲を選定し、大谷石壁面をそのまま貯蔵施設の壁体として利用すると仮定した。貯蔵施設として選定した空間の総床面積は2971m²、総体積は28436m³である。貯蔵施設の解析は、想定した貯蔵物に応じて貯蔵温度を貯蔵施設に与え、その温度が大谷石で構成される貯蔵施設壁体に与える影響を確認し、施設で設定される温度を与えて伝熱負荷計算を行うことを目的としている。

よって、空気の移流による熱の移動は考慮せず、空気は固体として扱い、熱伝導解析を行った。

貯蔵施設の解析モデルには、初期温度として286.15K(13℃)を与え、境界条件として解析モデルの境界面を286.15K(13℃)に固定、貯蔵施設の温度を貯蔵物に応じた、各貯蔵温度に固定した。

以上の条件に従って、本研究では、施設を50年間稼働



図-1 対象地下空間平面図

表-1 解析に使用した物性値

物性値	大谷石	空気
熱伝導率 (W/m℃)	1.074	2.427
比熱 (J/kg℃)	1508.3	1010
密度 (kg/m ³)	1730	1.234

させることを想定した熱伝導計算を行い、施設稼働1年後と50年後の貯蔵施設周辺温度を求めた。この際、タイムステップ(計算時間間隔)は、 1.919×10^4 秒(約5時間)として解析を行った。

ここに、本研究では、大谷石壁体をそのまま施設の壁体としたため、施設温度が氷点下となる場合、大谷石壁体およびその間隙水は凍結を起こす。この結果、大谷石の比熱と熱伝導率はともに大きくなる⁸⁾。このため、大谷石は、熱を貯めやすく、また熱を伝えやすくなると考えられる。しかしながら、この場合、凍結範囲の決定も同時に解析で求める必要があるので、本研究ではこの材料定数の変化を考慮しないものとした。

(2) 解析結果と考察

a) 貯蔵施設(ホウレンソウ貯蔵)

貯蔵施設の解析は、想定した貯蔵物とその貯蔵温度に応じて三つのパターンを行った。

ここでは一例として、ホウレンソウ貯蔵の解析結果を示す。図-2、図-3において、計算前の温度は、地下空間に設備の温度を初期温度として設定した状態であり、熱伝導計算を実施していない状態を意味する。この他に、設備稼働1年後と50年後の、熱伝導計算を実施して求めた結果を、温度分布として示した。

各貯蔵施設の稼働から1年後と50年後の温度分布より、設備稼働から短期(1年後)、長期(50年後)の貯蔵温度の影響範囲が確認された。今回、境界条件として、施設から20m離れた位置の温度を13℃に固定した最外面を設けたが、50年後には境界近くまで温度が伝わっているのが確

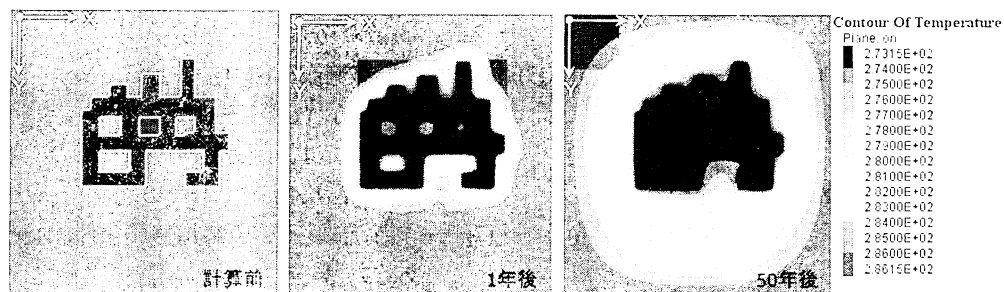


図-2 ホウレンソウ貯蔵 深さ 20m 地点

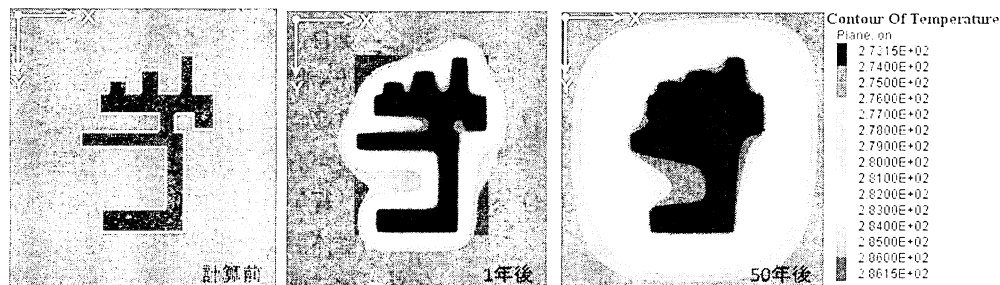


図-3 ホウレンソウ貯蔵 深さ 30m 地点

認できる。よって、50年後以降も熱が大谷石壁体に伝わることが予想されるので、さらに長期的な解析を行う場合、温度を固定する境界を施設からさらに遠くに設定することが望まれる。また、想定した全ての貯蔵温度で、施設稼働開始50年後には、施設近傍の残柱が完全に貯蔵温度と同等になることが確認された。このため、貯蔵温度が氷点下となるような施設では、残柱の凍結が予想されるので注意が必要である。

6. 地下空間の有効利用に関する検討

(1) 昇降設備に取り扱いについて

既往の研究⁵⁾において、地下空間の有効利用を検討する方法は、その一例として地上施設と地下施設の電力消費量を比較する手法が採られてきた。この時、地下空間に施設を建設することを考えた時、地上から地下空間、または地下空間から地上への移動手段として昇降設備を設置する必要がある。このため、地下施設の電力消費量は、地下施設の操業による電力消費量と昇降設備の電力消費量を足し合わせたものとなる。これに対して、地上施設の電力消費量は、施設の操業による電力消費量のみであるため、両者の電力消費量を比較すると地下施設が不利になるケースがあった。

このため、本研究では昇降設備の運転時間や昇降設備の種類を、昇降設備の性能、搬入量をもとに再検討し、設置する昇降設備の電力消費量を算出した(表-2)。

(2) 有効利用の検討項目⁵⁶⁾

貯蔵施設の有効利用の検討を行うにあたって、その検

表-2 昇降設備の年間電力消費量の比較⁴⁾

	年間運転時間 (h/年)	年間電力消費量 (kW/年)
本研究	892.2	12449.61
既往研究	2000	27906.98

討項目と手順を以下に示す。

a) ピーク冷暖房負荷

まず、伝熱負荷を算出する(式(1))。伝熱負荷とは、屋根・外壁および、ガラス窓を通した、施設内と施設外熱の出入りによって生じる負荷である。

$$\text{面積} \times \text{熱通過率 } K \text{ 値} \times \text{温度差} = \text{伝熱負荷(kJ/h)} \quad (1)$$

注：1)面積とは、屋根・外壁および、ガラスの面積である。

2)熱通過率 K 値は、屋根・外壁およびガラスを構成する材料の厚さと、熱伝導率に依存する値である。

3)温度差は、施設内と施設外の温度の差である。

次に、日射によって生じる日射負荷、施設内部の照明や人体の熱によって生じる内部負荷、外気の導入によって生じる外気負荷を算出する。

以上の算出した項目を用いて、顕熱と潜熱の冷房負荷と暖房負荷をそれぞれ式(2)～式(5)を持ちいて算出する。

$$\text{屋根・外壁の伝熱負荷} + \text{ガラスの伝熱負荷} + \text{日射負荷} + \text{内部負荷} + \text{外気負荷} = \text{冷房顕熱負荷(kJ/h)} \quad (2)$$

$$\text{屋根・外壁の伝熱負荷} + \text{ガラスの伝熱負荷} + \text{外気負荷} = \text{暖房顕熱負荷(kJ/h)} \quad (3)$$

$$\text{内部負荷} + \text{外気負荷} = \text{冷房潜熱負荷(kJ/h)} \quad (4)$$

$$\text{外気負荷} = \text{暖房潜熱負荷(kJ/h)} \quad (5)$$

冷房負荷の顕熱と潜熱を足し合わせたものが、ピーク冷房負荷となる(式(6)). 暖房負荷も同様である(式(7)).

$$\begin{aligned} \text{冷房顕熱負荷} + \text{冷房潜熱負荷} \\ = \text{ピーク冷房負荷(kJ/h)} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{暖房顕熱負荷} + \text{暖房潜熱負荷} \\ = \text{ピーク暖房負荷(kJ/h)} \end{aligned} \quad (7)$$

b) 日負荷

冷房と暖房の日負荷は、式(8)、式(9)を用いて算出する.

$$\begin{aligned} \text{ピーク冷房負荷(MJ/h)} \times \text{全負荷相当時間(h/日)} \\ \times \text{日冷房運転時間(h/日)} \div 12 = \text{日冷房負荷(MJ/日)} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{ピーク暖房負荷(MJ/h)} \times \text{全負荷相当時間(h/日)} \\ \times \text{日暖房運転時間(h/日)} \div 12 = \text{日暖房負荷(MJ/日)} \end{aligned} \quad (9)$$

c) 年負荷

冷房と暖房の年負荷は、式(10)、式(11)を用いて、以下のように算出する.

$$\begin{aligned} \text{ピーク冷房負荷(MJ/h)} \times \text{全負荷相当時間(h/年)} \\ \times \text{日冷房運転時間(h/日)} \div 12 = \text{年冷房負荷(MJ/年)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{ピーク暖房負荷(MJ/h)} \times \text{全負荷相当時間(h/年)} \\ \times \text{日暖房運転時間(h/日)} \div 12 = \text{年暖房負荷(MJ/年)} \end{aligned} \quad (11)$$

d) 年間冷暖房電力消費量

貯蔵施設の空調設備として、一般的に貯蔵施設で用いられる中央式ヒートポンプチラーを想定し、年間冷房電力消費量と年間暖房電力消費量は、式(12)、式(13)を用いて算出する.

$$\begin{aligned} \text{年冷房負荷(MJ/年)} \times \text{冷房時 COP} \times \text{地区修正係数} \times 0.278 \\ = \text{年間冷房電力消費量(kWh/年)} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{年暖房負荷(MJ/年)} \times \text{暖房時 COP} \times \text{地区修正係数} \times 0.278 \\ = \text{年間暖房電力消費量(kWh/年)} \end{aligned} \quad (13)$$

注：1)中央式ヒートポンプチラーの冷房 COP=2.89

2)中央式ヒートポンプチラーの暖房 COP=3.53

3)地上施設の地区修正係数は宇都宮の値を用い、冷房時 1.00, 暖房時 1.06 とした.

4)地下施設の地区修正係数には冷房時, 暖房時ともに最も不利になる地区の係数を用いた. 冷房時 1.09(名古屋), 暖房時 1.31(旭川)とした.

5) 1(kWh/年) = 0.278(MJ/年)とし、式中で単位変換を行った.

e) 電力消費による CO₂ 排出量

冷暖房及び昇降設備の年間電力消費量に、電力の CO₂ 排出原単価を掛け、電力消費による CO₂ 排出量を算出した.

注：日本における電力の CO₂ 排出原単価 = 0.351[kg-CO₂/kWh]⁷⁾

(3) 貯蔵施設の検討結果と考察

貯蔵施設の検討結果としてハウレンソウ貯蔵における結果を示す(図-4~11).

ここでは、貯蔵施設の熱負荷の比較をするために、ピーク冷暖房負荷、日冷暖房負荷を算出した. その結果、季節と設定した壁体厚さの条件、操業から 1 年後の状態あるいは、50 年後の状態によって、地上施設が有利な場合と、地下施設が有利な場合が混在し、直接比較することが困難である(図-4, 5). そこで、様々なピーク時間やピーク日、季節を考慮した、1 年間を通して熱負荷である年間冷暖房負荷を計算した. この結果を比較すると、全ての貯蔵物に対する全想定壁厚さのパターンにおいて、地下施設が有利な結果となった(図-6, 7).

また、経年によって貯蔵温度が大谷石壁体に伝わり、大谷石壁体温度が施設温度に近づくことで、地下施設の伝熱負荷は減少する傾向が確認された.

さらに、年間電力消費量、年間 CO₂ 排出量も、全貯蔵物に対する全想定壁厚さのパターンにおいて、地下施設が有利という結果を得た(図-8~11).

50 年後における地上施設と地下施設の電力消費による CO₂ 排出量を比べると、地下施設は最低でも CO₂ 排出量を 39%削減可能(ハウレンソウ貯蔵、壁厚さ 1m パターン)であるという結果を得た.

7. まとめと今後の課題

(1) 熱伝導解析

a) 貯蔵施設

施設稼働から 1 年後と 50 年後の大谷石壁体の温度分布を確認した. また、本解析では実際の大谷採石地下空間を解析で再現し、大谷石壁体及び地下空間内の任意の点の温度を抽出することが可能である. その結果、貯蔵温度が大谷石壁体に影響を及ぼす範囲とその壁体温度を得ることができた.

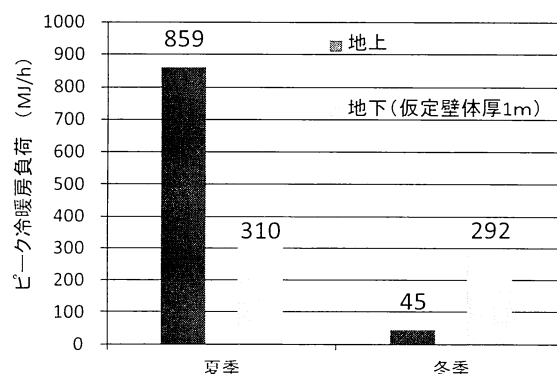


図-4 ハウレンソウ貯蔵のピーク冷暖房負荷 (1 年後)

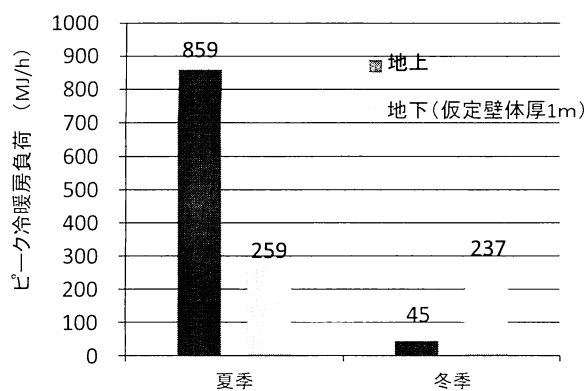


図-5 ホウレンソウ貯蔵のピーク冷暖房負荷 (50 年後)

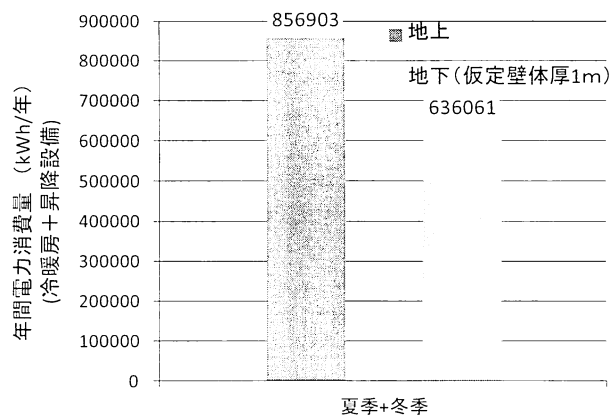


図-8 ホウレンソウ貯蔵の年間電力消費量 (1 年後)

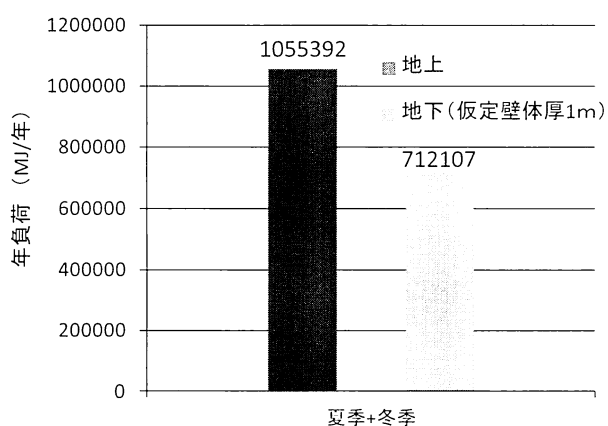


図-6 ホウレンソウ貯蔵の年間冷暖房負荷 (1 年後)

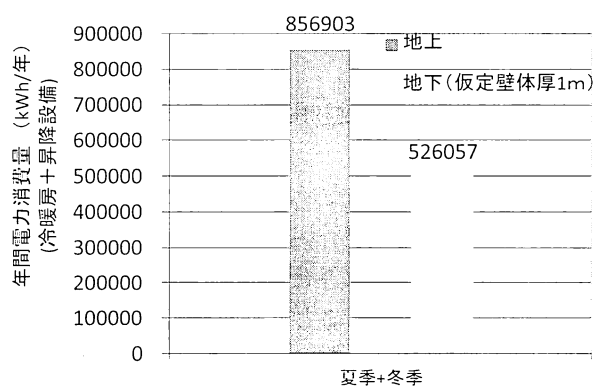


図-9 ホウレンソウ貯蔵の年間電力消費量 (50 年後)

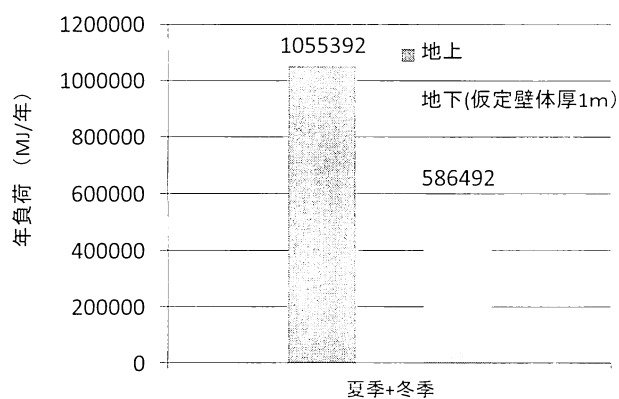


図-7 ホウレンソウ貯蔵の年間冷暖房負荷 (50 年後)

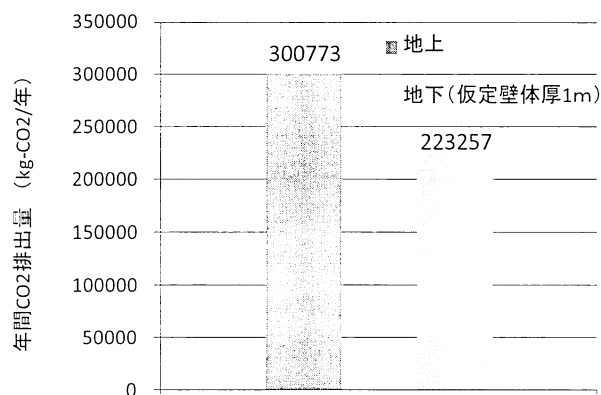


図-10 ホウレンソウ貯蔵の年間 CO₂排出量 (1 年後)

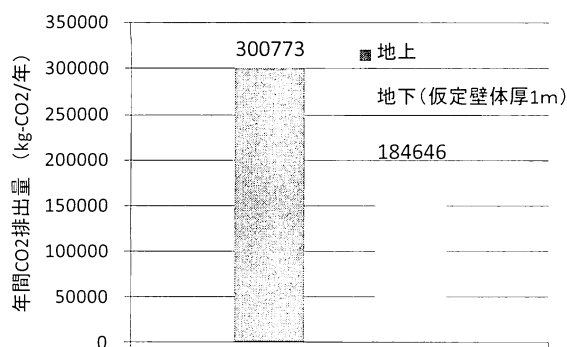


図-11 ホウレンソウ貯蔵の年間 CO₂排出量
(50年後)

さらに、50年後の大谷石壁体の温度分布から、50年後には地下空間内の残柱温度は完全に貯蔵温度の影響を受けることが分かった。

(2) 採石地下空間の有効利用可能性の検討

a) 貯蔵施設

本研究では、全ての貯蔵物の全ての想定壁厚さパターンにおいて、地下施設が有利な結果となった。また、経年によって貯蔵温度が大谷石壁体に伝わり、大谷石壁体温度が施設温度に近づくことで、地下施設の伝熱負荷が減少する傾向が確認された。

(3) 今後の課題

a) 貯蔵施設の熱伝導解析

大谷石壁体及び地下空間内の任意の点の温度を抽出する際、本解析で使用した大谷採石地下空間モデルは、既往の研究²⁾で使用された棒状の一次元モデルに比べて形状が複雑なので、三次元的に熱が広がる場所では、大谷石壁体の温度が危険側に抽出される可能性がある。

また、50年後の温度分布は、貯蔵温度の影響が境界面付近まで及ぶことが観察できる。よって、境界部周辺の温度は境界条件による影響が顕著になると考えられるため、長期間の解析を行う際は、境界面を地下施設からさらに遠ざけた条件設定で解析を行うことが望ましい。

参考文献

- 1) 全国地球温暖化防止活動推進センター
URL: <http://www.jccca.org> (2010年12月 参照)
- 2) 清木隆文, 阿部友哉: 熱環境を考慮した大谷石採石地下空間の有効利用に関する検討, 地下シンポジウム論文・報告集, 第16巻, 土木学会[投稿論文], pp.7-12, 2011.
- 3) 柴田正史, 清木隆文, 横尾昇剛, 西田幸夫: 地上施設

との比較に基づく大谷採石地下空間の環境負荷に関する研究, 地下シンポジウム論文・報告集, 第13巻, 土木学会[審査付論文], pp.13-22, 2008.

4) 三菱電機 製品情報

URL: <http://www.mitsubishielectric.co.jp/index.html>
(2011年 1月 参照)

5) 岡 建雄: わかりやすい グリーンオフィスの設計, オーム社出版 1991.

6) 空気調和・衛生工学会: 空気調和設備計画設計の実務の知識(改訂2版), オーム社出版, 2007.

7) 電気事業連合会 電気事業における環境行動計画2010 URL: <http://www.fepc.or.jp/index.html> (2011年 2月 参照)

8) 土木学会 岩盤力学委員会: 熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして, 丸善出版社, 平成18年, 2006.