

トンネル断熱材の国内と海外（ノルウェー）の動向

Verification of prevent or reduce the opportunity of frost in tunnels in Japan and Norway

○(株)地崎工業 技術部 正会員 須藤敦史 (Atsushi Sutoh)
 北海道大学大学院 フェロー 三上 隆 (Takashi Mikami)
 北海道開発土木研究所 正会員 佐藤 京 (Takashi Satou)
 (株)地崎工業北海道本店 正会員 河村 巧 (Takumi Kawamura)

1. はじめに

北海道の道路トンネルは冬期間の地山凍上等による覆工コンクリートのひび割れや変形などの凍害を受ける危険性が高く、道内の在来工法で施工された道路トンネルの約半数は何らかの変状が認められている¹⁾。そこで北海道開発局では、新設・既設のトンネルにおいて坑口部の一定区間に地山凍結防止の目的で断熱材を施工している。

このトンネル断熱材は、硬質ウレタンフォームの仕様で吹付けもしくは板材で施工されおり、特に吹付け断熱材の発泡・保温のためのガスには化学的に安定なフロンガスが使用されていた。しかし、モントリオール議定書（オゾンホール破壊防止）や京都議定書（地球温暖化防止）などにより、フロンガスの製造禁止や代替フロンの排出抑制対策が制定されている。

本論文ではトンネル断熱材の施工時に発泡剤として使用される特定・代替・ノンフロンの国内状況を外観し、同時に海外（ノルウェー）のトンネル断熱材に対する動向を報告するものである。

2. オゾン層の保護と地球温暖化防止について

フロンガスは1928年に開発された自然界には存在しない人工物質で化学的に安定で液化しやすく、かつ不燃性であることより、冷媒などとして多方面に利用されていた。

さらにフロンガスは蒸発しやすく人体に毒性がないという性質などにより断熱材やクッションの発泡剤、半導体や精密部品の洗浄剤、スプレーの噴射剤(エアゾール)など様々な用途にも活用されてきた。

ところが、フロンガスが大気中に放出されると成層圏まで上り、オゾン層を破壊するメカニズム、加えて1985年には

南極でオゾンホールが発見されたことよりフロンガスによるオゾン層の破壊は大きな波紋を起こした。

さらにオゾン層の破壊により太陽光の紫外線量が増加し、皮膚ガンや白内障など健康に悪影響をもたらすばかりでなく、動植物の遺伝子を傷つけ生態系の生存を妨げる恐れがあると言われている。

そこで「オゾン層保護に関するウィーン条約(1985年)」に基づき、フロンガス規制のための国際的な枠組みとして「モントリオール議定書」(1987年)が採択され、国際的にオゾン層破壊物質の規制が始まり、特定フロン等(CFC:クロロ・フロロ・カーボン, HCFC:ハイドロ・クロロ・フロロ・カーボン等)の生産・輸入は段階的に規制され、代替フロンへの転換が進められている。

しかし、代替フロン等はオゾン層の破壊は少ないものの二酸化炭素の数百～数万倍の温室効果を有しているため、代替フロン(HFC:ハイドロ・フルオロ・カーボン)とともにPFC:パーフルオロカーボン, SF6:六フッ化硫黄が地球温暖化の対象ガスとなっている。

そのため1992年には、地球温暖化を防止するための「気候変動枠組み条約」が締結され、それに基づいた温室効果ガスの排出抑制対策として1997年に「京都議定書」が採択され（日本の批准2002年）、代替フロン等3ガス(HFC, PFC, SF6)の排出抑制対策が講じられている。

ここで特定フロン(CFC-11, HCFC-141b)、代替フロン(HFC-245mfc, -365mfc, -134a)および二酸化炭素のオゾン破壊係数(ODP)と地球温暖化係数(GWP)を表.1に示す。

3. フロンガスの規制について

(1)特定フロン(CFC, HCFC)

表.1 特定・代替フロンガスと二酸化炭素の比較

項目	①特定フロン		②代替フロン			③ノンフロン
	CFC-11	HCFC-141b	HFC-245mfc	HFC-365mfc	HFC-134a	二酸化炭素
オゾン破壊係数 (ODP)	1.0	0.11	0	0	0	0
地球温暖化係数 (GWP)	4,000	580	820	840	1,300	1
沸点 (°C)	23.8	32.0	15.3	40.2	-26.5	-

*90年代ではHCFCが代替フロンと呼ばれていたが、最近ではHFCへの転換が新たな課題となったことからHFCを代替フロンと呼んでいる。

我が国ではフロンガスの規制のための国際枠組み（モントリオール議定書）に基づき、1988年に「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律（オゾン層保護

表.2 先進国の温室効果ガスの削減目標

国 名	日本	米国(否批准)	EU 全体	カナダ	ロシア
削減目標(1990 年比)	-6%	-7%	-8%	-6%	-0%

法)」を制定しており、1999年7月からの特定フロンの削減および全廃を行っている。

トンネル断熱材の硬質ウレタンフォーム用の発泡剤として主に用いられている特定フロン(HCFC141b)の生産・輸入は2003年またHCFC142bは2010年で全廃となる。したがって2004年以降は代替フロン(HFC)の使用が義務付けられることになる。

(2)代替フロン(HFC,PFC,SF6)

代替フロン等3ガス(HFC,PFC,SF6)は、オゾン破壊係数の低い物質の代替として幅広く使用されているが、温室効果が高いことから1997年12月に採択された京都議定書においては二酸化炭素やメタン、一酸化二窒素と並んで排出削減の対象ガスになっている。

ここで温室効果ガスの定義を以下に記述する。

- ① CO₂ (エネルギー起源) : 化石燃料の燃焼, (非エネルギー起源) : 工業プロセス
- ② メタン (CH₄) : 家畜,水田,廃棄物
- ③ 一酸化二窒素 (N₂O) : 施肥,工業プロセス
- ④ HFC (代替フロン) : 冷媒,断熱材用発泡剤,エアゾールなど
- ⑤ PFC:溶剤,洗浄剤など
- ⑥ SF₆:電力用絶縁物質,半導体洗浄剤など

表.3 特定・代替・ノンフロン断熱材 (フォーム) の性能

項目 \ 発泡剤	特定フロン (HCFC)	代替フロン (HFC)	ノンフロン
		4 社平均	
密度 (kg/cm ³)	25 以上	32.3	30±3
圧縮強さ (N/cm ²)	15 以上	19.6	10 以上
熱伝導率 (W/mK)	0.0232 以下 (劣化 15%考慮)	0.027	0.034 以下
		0.031(劣化 15%考慮)	0.039(劣化 15%考慮)
吸水量 (g/100cm ³)	3 以下	1.9	3.0以下
防火性能試験 (難燃 3 級)	合 格	合 格	合 格

表.4 代替フロン断熱材の力学試験

試験項目,条件	アフノス PN-F/SP-295H (難燃材料・発熱性試験適合)
HFC-143a 添加量(%) スプレー機/ガン,チャンバー	1.0 FF-1600/D ガン , #70
外気温 (°C) ,作業所温度 (°C) プライマリーヒーター設定 (°C) ホースヒーター設定 (°C)	-3.0 , -1.0 40~45 38
圧縮強度 (N/cm ²) :厚さ方向,横方向	18.9 , 7.7
圧縮弾性係数 (N/cm ²) :厚さ方向,横方向	568 , 176
曲げ強度 (N/cm ²) :厚さ方向,横方向	17.0 , 16.0
曲げ弾性係数 (N/cm ²) :厚さ方向,横方向	130 , 130

定められた先進国の温室効果ガスに対する第一拘束期間 (2008年～2012年) の1990年に対する総排出量比の削減目標を表.2に示す。

ここで代替フロン等3ガス

(HFC,PFC,SF6)に対しては削減期間を第一拘束期間 (2008年～2012年) 以前の2010年までと設定し、総排出量は1995年に対しては基準総排出量比プラス2%程度を目標としているが、2010年以降の削減目標は決まっていないのが現状である。

4. 代替フロン・ノンフロンの開発について

(1)代替フロン

このような状況下、トンネル用硬質フォーム発泡 (吹付け) 断熱材においてウレタンフォーム工業会では2004年をめどに代替フロン (HFC245fa) を代替物質として技術的問題点をクリアすべく技術開発を行った。

加えて業界として行動計画を策定し、HCFC 使用量の削減について2010年の使用見込み量の20%削減を努力目標としている。

ここで硬質フォーム発泡 (吹付け) のトンネル断熱材の代替フロン化における問題点を以下に示す。

- ① 地球温暖化防止会議 (COP 会議) において、代替フロンは温暖化効果ガスに指定されている。現在では2010年までの削減目標であるが、今後 COP 会議において再規制等の議論も予想されるため、COP 会議の動向が注目される。

- ② 現在の特定制フロンに比較して割高 (材料・機械設備の変更) になる。

- ③ 熱伝導率が従来品に比べて20%程度劣ることより、施工するトンネル断熱材が厚くなる。

(2)ノンフロン

ノンフロン化では、一般製品の一部で実用化されているが、まだトンネル用硬質フォーム発泡 (吹付け) 断熱材においては実用化されていないのが現状である。

京都議定書に基づいた地球温暖化対策推進大綱では2010年における代替フロン (HFC245) の削減目標が定めているのみで、以降の削減目標は定められていない。

加えて、各諸外国において2012



写真.1 力学試験状況



写真.2 熱伝導率試験状況

年における代替フロン（HFC245）の削減目標の達成で満足しており、ノンフロン化についての技術開発にはあまり積極的でないのが現状である。

ここで、硬質フォーム発泡（吹付け）のトンネル断熱材のノンフロン化における問題点を以下に示す。

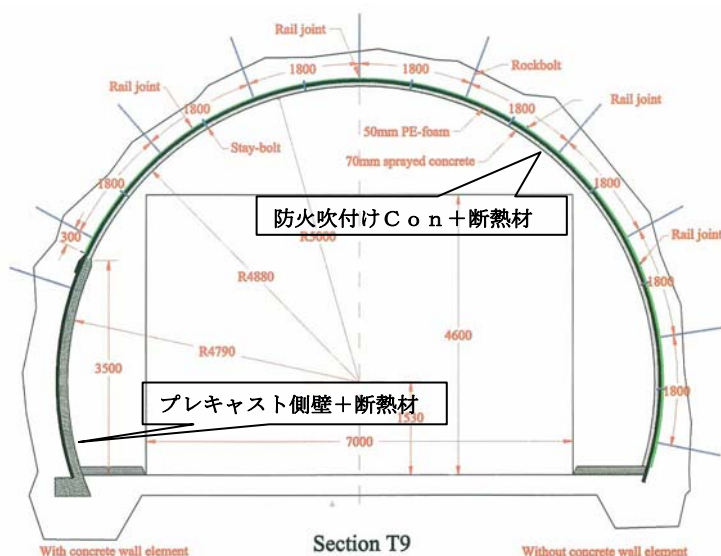


図.1 ノルウェーのトンネル構造²⁾

- ① 熱伝導率が代替フロン使用時よりさらに悪くなる。従って、施工するトンネル断熱材が厚くなる。
- ② 発泡規制があり粘性・難燃性が劣るため、施工条件が限定される。
- ③ 代替フロンに比較して割高（材料・機械設備の変更）になる。

ここで、表.3に特定・代替・ノンフロン断熱材（フォーム）の断熱性能を示す。

代替フロンの熱伝導率は0.031(劣化15%考慮)W/mK、ノンフロンでは0.039(劣化15%考慮)W/mKと板状断熱材の0.040W/mKと変わりのない値となっている。

(3)断熱材の力学的性質

断熱材の発泡材料の代替・ノンフロン化に伴い圧縮強度の低下や弾性係数などの力学定数の低下も予想される。これらの変化は二次覆工コンクリートの変形を誘発してクラック発生などの起因になる可能性がある。そこで代替フロン(HFC)発泡「アフノスPN-F/SP-295H」の弾性係数の試験結果を表.4および試験状況を写真.1, 2に示す。

5. 海外（ノルウェー）におけるトンネル断熱材の動向

一般にわが国の山岳トンネルは、吹付けコンクリートなどで支保工を構築した後に覆工コンクリートを施工して仕上げられ、この時支保工と覆工の間には防水シートが施工され、両者が一体化しないような構造として設計されている。

これに対してノルウェーなど北欧諸国では図.1 に示すように単層あるいは多層からなるトンネル構造で支保層や覆工層が一体化されるシングルシェル・ライニングで設計されている（図.2, 写真3）。

また北欧諸国では比較的良好な岩盤であることより、トンネル内装版を施工してシングルシェルの支保部材との間に空間確保する構造が多く採用されている。この内装の特徴は湧水・はく離はく落・あるいは表面の不陸に関する問題を解決でき、加えて支保部材（吹付けコンクリート）などのメンテナンスも容易になり、トンネルの建設費・維持管理費を軽減できる構造といえる（写真4.5）。

ノルウェーの道路トンネルにおいて施工される断熱材は、ポリエチレンフォーム（板状）が施工され、設計気温 F_{10} が $10,000h^{\circ}C \sim 25,000h^{\circ}C$ （10年積算凍結温度）となっている³⁾。

しかし凍結積算温度が大きい場合 $F_{10} > 25000h^{\circ}C$ 、表.5のようにポリエチレンフォーム（板状）の最小厚で75～100mm施工するものとし熱伝導率は0.035W/mkを用いている。

ここで、ノルウェーで断熱材として用いられているポリエチレン(PE)フォームと

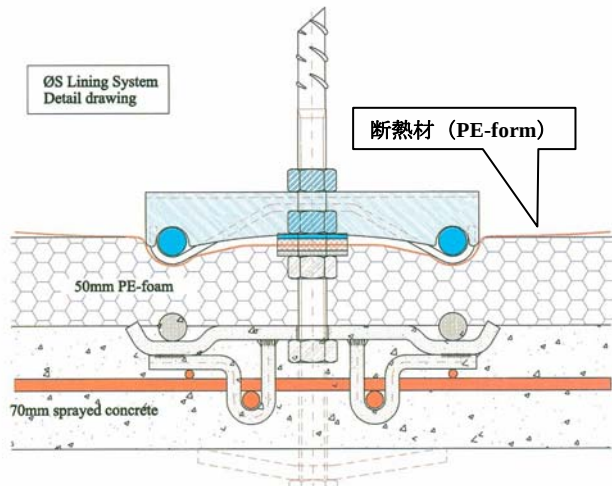


図.2 トンネル内装の詳細³⁾

表.5 ポリエチレンフォームの厚さ

F10T(h℃)	10,000	20,000	30,000
厚さ	45mm	60mm	2×50mm



写真.3 断熱材 (PE フォーム)

ポリスチレンフォームの断熱性能を表.6に示す.

7. ま と め

トンネル用断熱材のノンフロン化は代替フロン化に比較して難しいのが現状であるが,代替フロンが地球温暖化効果ガスに指定されている以上,より一層の研究開発が必

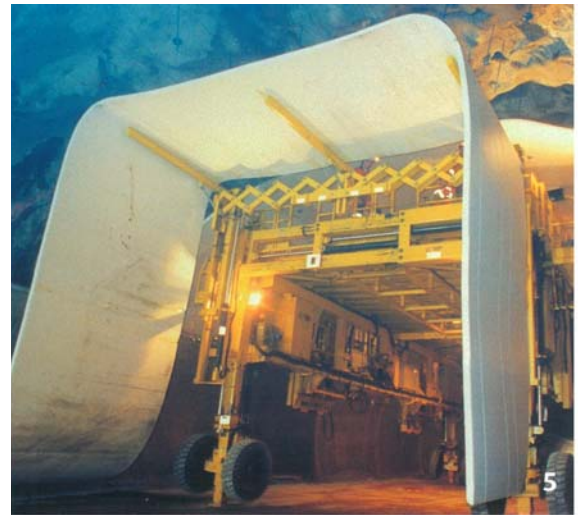


写真.4 断熱材 (PEフォーム) の取付け⁴⁾



写真.5 トンネルの仕上がり³⁾
要である.

【参考文献】

- 1) 坂本稔,川北稔,五十嵐敏彦:道路トンネルの変状実態-北海道の場合-,トンネルと地下,第20巻5号,pp.31~35,1989.
- 2) SRG SCANDIAVIAN ROCK GROUP パンフレットより
- 3) Road Tunnels (Norwegian Design Guide):Norway Public Roads
- 4) OS-Lining System Orsta Stal パンフレットより

表.6 断熱材の性能比較表

試験項目	単 位	規格値	日 本	PE フォーム*	PS フォーム*
見掛密度	kg/m ³	33 以下	33	35	26
圧縮硬さ	N/m ²	3.2 以上	3.7	6	30 以上
熱伝導率	Kcal/m.h.℃	0.034 以下	0.034	0.041	0.029
吸水率	g/100cm ²	0.7 以下	0.4	0.03	0.01
燃焼性	—	UL94HF-1 適合品	○	△	△

*現地にて採取した資料により (試験協力:日立化成)