

ラッピング工法用防爆システムの開発

メタンガス発生地盤対象

芳賀由紀夫・栄 毅熾・島田哲治

Keywords: methane, explosion-proof, Wrapping Method, waterproof, removal of a static electricity

メタンガス, 防爆, ラッピング工法, 防水, 静電気除去

1. 序

筆者等は, 平成12年度にラッピング工法^{1) 2)} (トンネル外周被覆工法, 以下本工法と称する) を, 五洋建設・奥村組・日立建機・IHIと共同開発した。

本工法は, セグメント外周を止水性と耐久性に優れた防水シート (以下, シートと称す) で覆う工法である。

このことにより, 高水圧下における止水性の向上と, 腐食性環境下の地盤におけるセグメントの保護を行い, トンネルの長寿命化を達成することが可能となる。

一方シールド工事において, 腐食性環境下における地盤等で, 施工中に可燃性ガスの噴出する恐れのある場所では, 法令により防爆対策が義務付けられており, 施工条件に応じて種々の対策が講じられている。また, 本工法は通常シールド機の機構に加え, シートの巻立・溶着を行うための専用機構を装備していることから, それらの電気機器に対する防爆対策が必要となる。

平成13年度は, 防爆対応のシステムを共同開発したので, ここに報告するものである。

2. 開発の目的

シールド工事では, 可燃性ガスの分類中, メタンガス発生地盤を対象にした防爆対策の施工例が最も多い。そこで, メタンガスに限定したラッピング工法用防爆システム (以下, 本防爆システムと称す) を開発し, 本工法適用地盤の拡大を図るものである。

3. 開発項目

本防爆システムは, 次の二つの装置より構成される。

(1) 防爆型溶着装置

防爆対応のシート溶着用熱コテ (以下, ウェッジと称

す) を新規に開発することにした。防爆化にあたっては厚生労働省の検定, さらに検定申請者の資格が必要である。そこで防爆電気機器メーカーで, かつ資格を有する (株) 中村電機製作所に協力を依頼し, 国の認定機関である (社) 産業安全技術協会の検定を受けた。

(2) 防水シート静電気除去・監視装置

静電気除去機器のメーカーである春日電機 (株) の協力のもとに, 既存の製品を応用してシステム化を図った。

4. メタンガスについて

4.1 メタンガスの性状

メタンガスの性質を表-1に示す。検知器がないと存在に気づかず, トンネル上部に滞留しやすい。ガス状態での坑内噴出だけでなく, 被圧地下水に溶存していたガスが, 大気圧下の坑内で気化することがある。坑内への入坑禁止となる危険範囲も, 法的に定められている (安衛則389-8)。なお, 表-1に示す発火温度^{注1)} は, 産業安全研究所技術指針 (工場電気設備防爆指針1979年版) の測定例より引用した。

表-1 メタンガスの性質
nature of methane gas

記 号	CH ₄ (分子量 16.0)
比 重	0.5542 (空気=1.0)
密 度	0.679 g/リットル (15℃、1 気圧)
性 状	無色、無臭、水溶性
爆発濃度	約 5～15% (9.5%の時が最も激しい)
法的危険範囲	爆発下限の 30% (1.5%または 30%LEL)
発火温度	595℃

注1 可燃性ガスまたは空気との混合ガスが, 所定の条件のもとで加熱面に接触した時, 発火が起きる当該加熱面の最低温度である。可燃性ガス・蒸気にはそれぞれ固有の発火温度があり, これまで多くの可燃性ガス・蒸気について発火温度が測定されている。発火温度は測定装置, 測定技術等によってバラツキがあり, 絶対的な値ではない。

4.2 土質と発生地域

メタンガスが発生しやすい土質はシールド工法の適用に限った場合、泥炭・腐食土・有機質土層を含む土質である。地域的には、有楽町層（東京下町低地：江東区、江戸川区、墨田区、台東区など）、濃尾平野、大阪軟弱土層、琵琶湖周辺などが知られている。

5. シールド工法におけるメタンガス対策の現状

シールド工法では、メタンガス等の可燃性ガスの発生する恐れのある場合には、これらのガスを希釈・拡散・排気できる換気設備の設置に加えて、ガス濃度の測定・記録、警報装置の設置、使用機器の防爆化などの対策を行っている。トンネル内のすべてにおいて危険度が大きい場合は、坑内全体を防爆化する必要があるが、メタンガスの発生個所がシールド機周辺に限定される場合には、今までの実績としては坑内換気（エアカーテン併用など）とシールド機本体および周辺機器の防爆化の対策例が多く見受けられる（図-1参照）。

現状のシールド機本体および周辺機器の防爆化にあたっては、各装置に用いる電気機器が対象になる。ほとんどは、既存の防爆対応を図った電気機器（電動機、油圧機器、メータなど）を用いることで対応している。なお、施工時におけるメタンガスの坑内流入箇所として、シールド機のテールシール、泥土圧シールド工法のスクリーコンベアの排土口、セグメント継手部などが考えられることから、特にこれらの箇所を中心として濃度の監視を行っている。

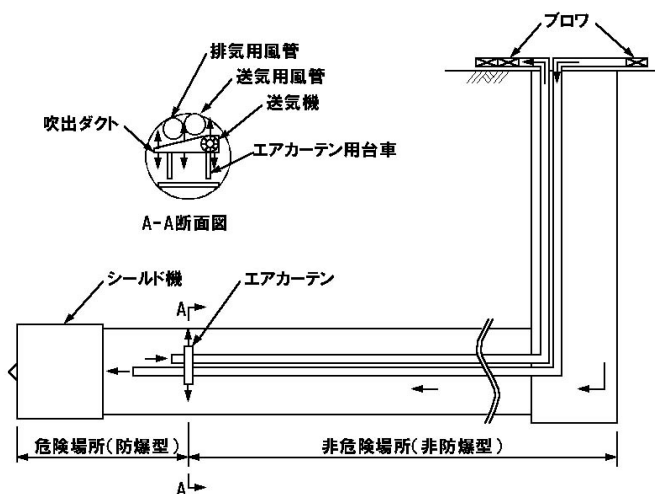


図-1 メタンガスが発生するシールド工事の換気例
Example of ventilation for the shield construction
in grounds including methane gas

- シールド機と後続台車間にエアカーテンを設置し、危険域を限定、坑道内の全域に拡散するのを防止する。
- エアカーテンより前方を危険区域（防爆区間）とし、この区域に対し送排気併設方式の換気を行う。強制排気量は、強制送気量よりも多く設定し、常時エアカーテンより前方側（シールド機側）の気圧を、後方側（坑道部側）の気圧より低く保ち、坑道入気状態とし、常に新鮮な空気が坑内を占めるようにする。

6. 防爆構造について

6.1 危険場所（防爆区間）と非危険場所（非防爆区間）

(1) 「危険場所」の定義

可燃性ガス・蒸気を取り扱う工場や事業所や、或いはそれらが作業中に大気に放出・漏洩される場所では、空気と混合して「爆発性雰囲気」を形成する。爆発性雰囲気の量が無視できない程多く、また同時に着火源としての電気設備により爆発事故につながる可能性のある場所を、「危険場所」と呼ぶ。

(2) 「非危険場所」の定義

異常状態に於いても爆発性雰囲気が育成される可能性がない場所。

(3) 「防爆電気設備」の定義

危険場所で着火源とならないように特に技術的対策を講じた電気設備（電気機器・電気配線）を言う。

6.2 危険場所の分類

可燃性ガス・蒸気の放出・漏洩の頻度および爆発性雰囲気の存在時間によって、次の3等級に分類され、危険度は0種場所が一番高い。

- 0種場所
- 1種場所
- 2種場所

※今回開発の防爆システムは第1種場所に該当する。

6.3 防爆構造の種類

防爆構造の種類には次の6種類がある。

- 耐圧防爆構造
- 油入防爆構造
- 内圧防爆構造
- 安全増防爆構造
- 本質安全防爆構造
- 特殊防爆構造：前記5種類以外の構造で、爆発性ガスの引火を防止できることが、公的機関において試験その他によって確認された構造。

※今回開発した防爆仕様のウェッジは、特殊防爆構造で

型式検定を受けた。

7. 防爆システムの全体計画

防爆システムを組み込んだシールド機の概要を図-2に示す。本防爆システムは「防爆型溶着装置」と「防水シート静電気除去・監視装置」の2つの防爆電気機器から構成され、安全に施工ができるシステムである。

7.1 防爆型溶着装置

溶着装置の電気系統の火花や、シートを溶着する時に高温となるウェッジから、メタンガスへの引火・爆発を防ぐ装置である。ウェッジ内のヒータとリード線全体を密閉構造化するとともに、ウェッジの表面温度が所定温度（メタンガス発火点595℃の80%：476℃）以上にならないようにする制御回路を設けた。

ラッピング装置に組み込む防爆対応の溶着システムは、以下の機器から構成される。しかし、ウェッジに関連する機器以外は、既存の防爆電気機器を用いることで対応可能であることから、本報告ではウェッジに直接関係する構成機器（ウェッジ、ウェッジ端子箱、中継接続箱、制御盤）を「防爆型溶着装置」と称し、これらについて開発を行い、検定を受けた。

【溶着システムの機器構成】

1) 防爆仕様（危険場所：1種場所）を要する機器：

ウェッジ、ウェッジ端子箱、中継接続箱、押圧パワーユニット用電動機、溶着旋回リング用電動機、電源ケーブル、電磁弁、変換機箱、端子箱、ケーブルリール等

2) 非防爆仕様（非危険場所）の機器：

制御盤（非危険場所の後続台車近傍に設置）

7.2 防水シート静電気除去・監視装置

ポリエチレン製のシートを使用することから帯電しや

すく、施工時に、万が一静電気放電が発生するとメタンガスの着火源となり、爆発・火災を誘発する恐れがある。本装置は、シート巻き出し時の剥離・摩擦によって帯電する静電気を除去する防爆型静電気除去装置、および、その監視装置から構成される（本報での詳細記述は省略）。

8. 防爆型溶着装置の開発

8.1 開発条件の設定

開発にあたって以下の条件を設定した。

(1) メタンガスを対象にした防爆機器として検定に合格できる構造とする。

(2) ウェッジ表面温度を、メタンガス発火点（595℃）の80%である476℃以上にならぬよう温度制御する。

(3) ウェッジの構造は、検定費用の増額回避、製作性（同一品の製作）、溶着作業の一本化の理由から、円周方向溶着機および軸方向溶着機とも同一仕様（構造、寸法・形状、熱容量）とする。

8.2 防爆型溶着装置の機器構成

防爆型溶着装置は前述したように、ウェッジ本体部、ウェッジ端子箱、中継接続箱の防爆仕様機器と制御盤で構成される。なお、電力供給と温度制御を行う制御盤は非防爆仕様である。円周方向溶着装置の取り付け状況を図-3に示す。

8.3 ウェッジの構造検討

ウェッジの構造を決定するにあたって、防爆検定に合格するための条件、および製作上の条件を以下に設定した。なお製作時に判明した問題点についても併記する。

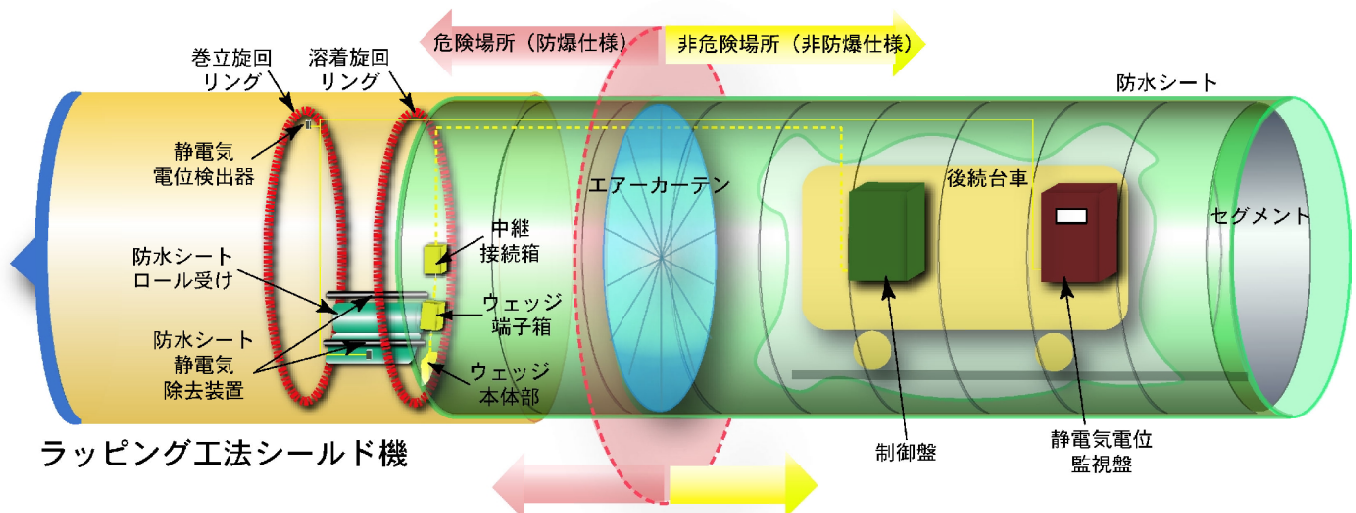


図-2 ラッピング工法用防爆システム概要図
Outline of an Explosion-proof System for the Wrapping Method

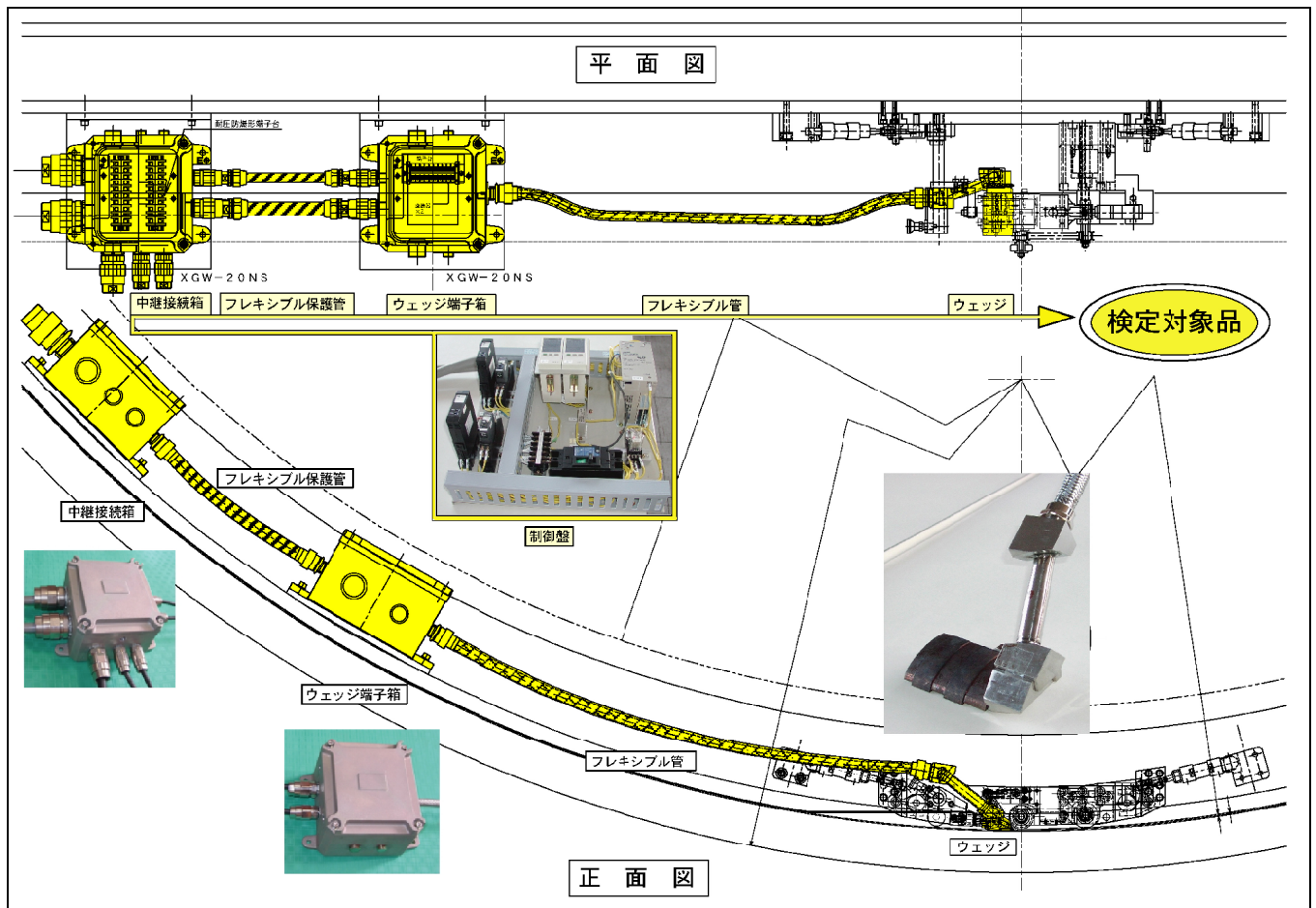


図-3 防爆型溶着装置（円周方向溶着機）設置図
Explosion-proof type sheet welding device

8.3.1 防爆検定上の条件

- (1) ウェッジ本体部は、万が一内部で爆発しても損傷しない強度に充分耐える強度（瞬間圧力1MPa）を有し、外部のメタンガスに着火しない構造とする。
- (2) 周囲のメタンガスに対し着火源とならないよう、ヒータ・熱電対・リード線は、ウェッジ本体部からウェッジ端子箱までを露出させない密閉構造とする。
- (3) ウェッジ本体に於いて、ヒータや熱電対の格納穴は、閉止穴とする（貫通穴不可）。
- (4) ウェッジ内での爆発強度上、穴部の周辺や、キリ穴底に於ける最小肉厚は3mm以上とする（ネジ穴も同様）。
- (5) 電線管（鋼管）内のリード線は、ウェッジからの熱伝導遮断と、振れ止めのため、耐熱仕様の絶縁管に納め、耐熱仕様の絶縁材（マグネシア）を詰める。更に電線管端（ウェッジ端子箱寄り）の外径を縮径状に絞り加工も行う。
- (6) ウェッジ本体部は、密閉構造を保持しながらその位置を自在に動かす必要があるため、ウェッジ端子箱までのケーブルを耐圧形のフレキシブル管に納める。

(7) フレキシブル管は、円周方向溶着機も、軸方向溶着機も同一サイズ、同一長さ（700mm）とする。

(8) フレキシブル管のネジ部に緩み止めのビスを設ける。

(9) 2000Vの耐電圧試験に対応できる絶縁にする。

300Wヒータからリード線が露出する箇所は離隔が小さく短絡の危険があるため、その部分に特別仕様の絶縁処理を行った。

(10) 密閉空間のリード線がウェッジ本体の内壁や電線箱蓋と接触したり、短絡しないように、耐熱性碍子による被覆を行う。

(11) 爆発試験検定受験用ウェッジの電線箱蓋にPF1/2ネジ穴を設けた。これは爆発圧力1MPaを確実に電線箱部に作用させるための試験対応の特別措置であり、実工事時にネジ穴は設けない。

8.3.2 防爆検定以外の条件

- (1) ウェッジ本体は通常仕様のウェッジと同材質PSL（日立金属製）とする。
- (2) 電線箱、電線箱蓋、電線管、接続材は、いずれもSUS 310Sとする。

＊ウェッジ本体の材質に近いSUS630が溶接上有利であるが、材料が特注で、銅塊からの削出し加工（放電加工含む加工の手間大）のため、加工費の高額が判明。そのため一般的に多く使用されているSUS 310Sを調査した結果、溶接性や入手性に優れ、機械的性質にも問題が無かったので採用することにした。

(3) ヒータは、500W×2本、300W×1本とする。

(4) ヒータはウェッジ本体に設けたヒータ挿入孔に全て埋まるようにする。

＊ヒータの部分露出部分が空焚きになり、ヒータの寿命上好ましく無いとの理由である（300W ヒータが、500W ヒータより長かった）。

8.3.3 製作時に判明した問題点と対策

(1) 問題点

- ・ウェッジ本体に、熱電対（外径φ1.6mm）の格納穴（φ1.7mm、実深さ38mm、穴入口側障害張出部13mm有り）を明ける作業が難航した。特注のドリルを10本程用意したが、4～5本折損。小径で深い閉止穴加工が問題。
- ・ドリルは、細く、か弱く、脆いため折損しやすく、穴奥に折損部が残ると回収不能になるので、熟練作業者が慎重に行った。

(2) 対応と結果

- ・熱電対メーカーに対し、格納穴径のサイズアップ（φ2mm以上を希望）を打診したが、現状の穴径φ1.7mmが推奨された（穴壁に密着させるのが良く、φ2mmでは感度低下が懸念され許容できないとの回答）。

(3) 今後の対応（参考）

- ・外径φ2.3mmの熱電対の採用案：ウェッジの最小肉厚確保や、サイズアップ時、密閉小空間内に納められるか、検定条件より逸脱するか等、検討・調査を要する。
- ・段付き穴案：穴の入口から中間までφ2～2.5mm、その先をφ1.7mm、とするような段付きの穴を検討する。
- ・部品形状が3次元の難解な形状であるため、図面の読みとりが難しく、加工者に模型提示が好ましい。

8.4 ウェッジの製作

ウェッジは2個製作し、防爆検定時の内部確認兼温度試験用ウェッジは、電線箱の蓋をしない状態とした。

8.5 電気機器の構成

防爆型溶着装置の電気機器の全体構成を図-4に示す。

ウェッジの温度が検定温度（メタンガス発火点595℃の80%：476℃）以上にならないように、安全回路を設けた。

(1) ウェッジ

ウェッジにはヒータを3本とウェッジの温度を測定する熱電対を2本組み込んでいる。2本の熱電対のうち、1

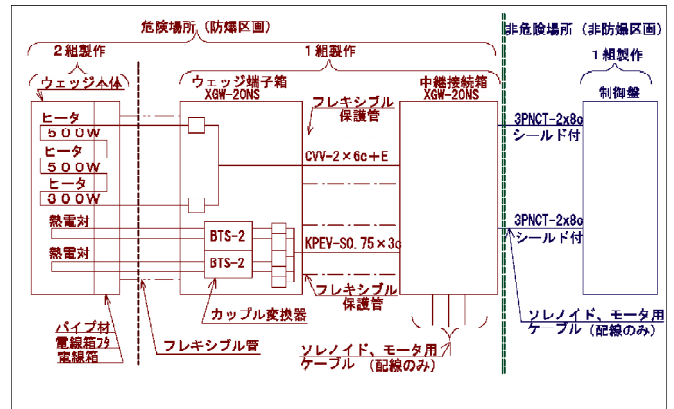


図-4 電気機器の全体構成図

Whole composition of the electric equipment

本はシート溶着時のウェッジの表面温度制御用であり、もう1本は異常時になった時の安全対策用である。

(2) ウェッジ端子箱

ウェッジ端子箱には防爆区間から非防爆区間へ接続するケーブルの線芯数を減らし、ケーブルリールに設置するスリップリングの数量を減らすために、出力側からDC24V電源を供給できるタイプのカップル変換器を組み込んでいる。

(3) 中継接続箱

ケーブルリール等への結線をするための端子を組み込んでいる。

(4) 制御盤

制御盤の回路図を次頁図-5に示す。2線式伝送器入力モジュール、デジタル温度調節計、電力調節器等で構成される。ウェッジ内に組込んだ2本の熱電対より得られた信号により、ウェッジ表面温度を制御する回路と、さらにその表面温度が異常時温度保護値を超えないように制御する安全回路を設けた。

デジタル温度調節器PXW1は熱電対Bからの温度信号を得て、ウェッジのヒータ温度を定常時の設定値である452℃に制御する。また、第1段目の異常時の温度保護値である465℃になると、警報を出力するとともに、ヒータ供給電源回路を遮断する。デジタル温度調節器PXW2は熱電対Aからの温度信号を得て、第2段目の異常時の温度保護値である470℃になると、警報を出力するとともに、ヒータ供給電源回路を遮断する^{注2)}。

注2 (社)産業安全技術協会の見解では、ウェッジ本体はスペースヒータに分類される。スペースヒータの防爆仕様を満足するには、温度保護装置を2段に設け、第1段と第2段の保護装置は独立したものであること、また、所定の温度に達した時にスペースヒータの電源を遮断することが義務付けられている。

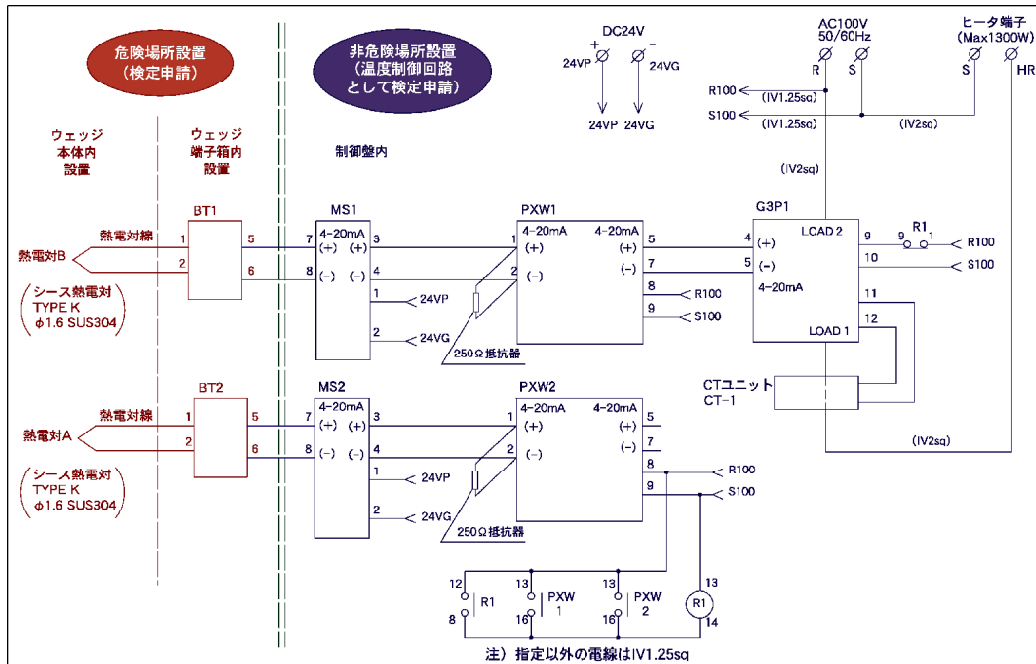


図-5 制御盤回路図
Control board circuit diagram

9. 検定試験

検定試験の内容を以下に示す。

- (1) 構造検査・・・構造・寸法を検査
 - (2) 爆発試験
 - ・爆発強度試験・・・爆発圧力に対する強度の確認
 - ・爆発引火試験・・・装置内部での点火爆発によって外部への引火が生じないことを確認
 - (3) 温度試験
 - ・制御温度試験・・・ウェッジ外面温度が所定の上限温度を超えないことを確認
 - ・異常時温度保護試験・・・警報温度で温度保護回路が作動することを確認
 - (4) 耐電圧試験・・・規定の耐電圧があることを確認
- 上記内容で、(社)産業安全技術協会の立会による検定試験を受け合格した。以下に、その概要を示す。

【検定の概要】

- ・申請者：(株)中村電機製作所
- ・製造者：(株)中村電機製作所
- ・品名：トンネル工事用ヒータ
- ・型式の名称：G-WGH-1
- ・防爆構造の種類：本体 特殊防爆構造
：端子箱 耐圧防爆構造
- ・対象ガス：メタン
- ・定格：電熱体 AC110V 1300W
(AC110V 500W×2、300W×1)

：正常時温度制御

温度検出器（熱電対）設定温度 452℃

：異常時温度保護

第1段 温度検出器（熱電対）設定温度 465℃

第2段 温度検出器（熱電対）設定温度 470℃

- ・型式検定合格番号：第56480号
- ・有効期間：平成14年3月25日～平成17年3月24日

10. まとめ

今回爆発試験を含めた検定において、ウェッジ内ヒータの耐電圧に神経を使ったが、無事検定を取得できた。

防爆対応工事でもラッピング工法が適用可能となり、施設としての供用開始後にも、地下水に溶存したメタンのセグメントからの坑内浸入を長期間に亘り防ぐ、という大きな効果が得られるものと期待している。

参考文献

- 1) 島田哲治，栄穀熾，原修一，畑山栄一，平沢幸久，藤井茂男：ラッピング工法（トンネル外周被覆工法）の開発（その1），土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，VI-031，pp.62-63，2001.10
- 2) 芳賀由紀夫，松岡義治，竹本光慶，古屋岳文，西里亮：ラッピング工法（トンネル外周被覆工法）の開発（その2），土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，VI-032，pp.64-65，2001.10