

地下施設における情報管理システムの構築

ESTABLISHMENT OF INTEGRATED UNDERGROUND INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM FOR UNDERGROUND FACILITIES

坂井 哲郎¹・柏瀬 陽一²・見掛 信一郎³・佐藤 稔紀⁴

Tetsuo SAKAI・Yoichi KASHIWASE・Shin-ichiro MIKAKE・Toshinori SATO

Recently, the development of underground in Japan is pointed out because of Japanese geographical feature and the stability of underground, and the use of underground requires the plan of severe safety measures to match particular conditions which underground has. The statistic data of the disasters shows that underground has high risk of fire, and which suggests that the information management system needs to be constructed a system to detect a change to abnormality at an early stage and to direct initial measures, escape route and so on.

Considering issues mentioned above, the authors design and develop the prototype of integrated underground information management system. It has been designed as combination of two technologies, one is Japanese coal mining technology for more than one hundred years and another is GIS (geographical information system) technology. The system includes some functions as follows; detection of abnormality using real-time ventilation network analysis, ventilation control to keep an escape, and searching for an evacuation route by GIS analytical function. All of the data and the results of analysis are shown systematically through graphical user interface to contribute to a decision support system for the operator.

This paper outlines the function that is necessary for the underground information management system, the logic and function of constructed prototype system, and the items to be developed and appended in the future.

Key Words : *underground facility, coal mining technology, ventilation network analysis, geographical information system, integrated underground information management system*

1. はじめに

近年、日本の狭い国土を反映し、また地下の安定性が着目され、地下空間の活用が注目されつつある。さらに、地下の有効利用や自然保護の観点から、また地層の研究を目的として、地下発電所や地下貯蔵施設、深地層の研究施設など、地下深部に大規模に展開される地下施設建設計画が推進されている。しかし、一般に地下空間の開発・利用には、地上とは異なる防災上の特殊性が存在する。すなわち、①地表との出入り口が限られている、②災害・事故時の地表への避難方向が昇りとなることが多く、時間および体力を要する、③空間容積が狭く暗いため心理的な圧迫感を与える、等である。したがって、これらの特殊性を踏まえた地下施設の安全確保のためには、地下特有の防災対策が不可欠である。

一方、地下施設の建設時や供用時には、自然条件に起因する大量ガス湧出、異常湧水、高応力、蓄熱発火等や、人工的に設置した設備等に依存する故障や火災等、様々な異常状態が発生する恐れがある。災害はこれらの要因がいくつか重なって生じるものであるが、異常状態の進行に伴い何らかの徴候が発生し、最終的に異常現象として発現する。この徴候を早期検知できれば、事故や災害の発生や被害の規模を抑制すること

キーワード：地下空間、炭鉱技術、通気網解析、地理情報システム、坑内情報管理システム

¹ 正会員 三井鉱山エンジニアリング株式会社 環境防災部長 技術士(資源工学)・工博

² 三井鉱山エンジニアリング株式会社 地質部 課長代理

³ 正会員 (独) 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター 施設建設課 工博

⁴ 正会員 (独) 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 工博

ができる。

筆者らはこの観点から、現在、(独)日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」と称する)が岐阜県瑞浪市に建設中の瑞浪超深地層研究所の設計段階において、通気網解析の手法を用いた防災対策の立案を行い、設計に反映させ^{1),2)}、また異常の早期検知と異常発生時のオペレータの意志決定支援を目的とした坑内情報管理システムの研究開発を実施、原子力機構の東濃鉱山をモデルにしたプロトタイプシステムを構築した¹⁾。このシステムは、センサにより収集した坑内情報やリアルタイムの通気網解析結果を地理情報システム(Geographical Information System, 以下「GIS」と称する)により統合分析し、通気施設の制御方法や入坑者への避難方法を表示するもので、従来の情報管理システムには類を見ないものである。ここにその概要を報告する。

2. 地下施設の情報管理について

(1) 情報管理システムの役割

災害統計を見てみると、第1発見者は巡回者等の入坑者であることが多い。しかし人が検知できる状態は異常の度合いがかなり進展していることが多く、また、坑内全域にくまなく入坑者がいることはあり得ない。従って機械的に早期検知を委ねることになるが、センサによる検知実績が乏しい原因は、徴候段階で異常値を示すセンサ情報を人が見逃すなど警報が上手く機能していなかったことが考えられる。

通常坑内情報は中央管理室や防災センター等に集められ一括監視されることが多いが、異常情報にオペレータや防災管理者(以下、単に「オペレータ」と称す)がどのような対処をするかが重要である。まずその異常値の真偽を確認し、異常の影響を予測し、初期対策を指示、状況によっては直ちに避難指示を出さなければならない。このとき、経験豊かなオペレータであれば、得られた情報からの確な判断を行うことができるかもしれない。しかし人間の経験や能力に期待することは判断のばらつきを容認することになるし、異常状態に直面しパニックに陥った人間の判断力は30%低下するとの研究報告もある。情報管理システムの役割は、正確な情報を迅速かつ適切な形で提供することによって、どのような状況下においてもオペレータが的確な判断を下せるように支援することである。このためには、様々な情報を処理し統合・分析して、人が判断しやすい形式に情報管理システムを作り上げられなければならない。

(2) 地下施設の災害の種類

産業別災害率を見ると、鉱業やずい道工事など地下産業の災害率が高い³⁾。これは、冒頭に記載した地下の持つ特徴に起因するものと考えられる。地下施設で起こりうる災害の種類としては、坑内火災、ガス爆発、有毒ガス中毒・酸欠、自然発火、落盤、出水、山はね、ガス突出、運搬災害等が考えられる。石炭鉱山の災害統計からは、ガス湧出がない、または少ない地下施設において留意すべき重要な災害は死亡者数から判断すると坑内火災と考えられる(図-1参照⁴⁾)。

一方、供用時の地下施設についても、鉄道や道路トンネルの火災や地下街・地下道等の火災等に対する防災対策が近年重視されてきている。このため本研究においては、坑内火災を対象とすることとした。

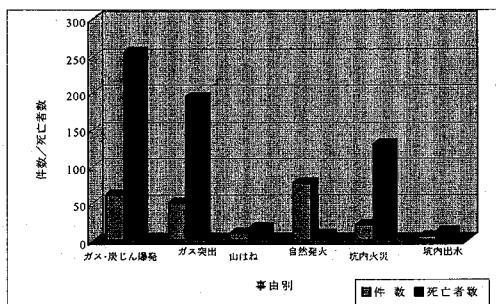


図-1 石炭鉱山における重要・重大災害の発生状況

(3) 災害時の対処の考え方

地下施設における火災は、特にそれが公共施設である場合、多数の罹災者が発生する傾向にある。これは、一般に地下施設においては避難路が限られ、往々にして火災ガスや煙の流路と重なっていることに起因する。その火源には、ケーブル、変電・制御機器、電動機械、エンジン駆動機械、ワイヤーやローラー、溶接機等の特定機器等の絶縁劣化短絡、過電流発熱、保護装置不良、接続部不良、アーク、摺動擦過発熱、破損発熱、裸火花などが考えられ⁴⁾、事実最近の地下鉄火災を見ても、これらの原因によるものが多い。また例え難燃性の材質を用いていても、燃えることには変わりがない。道路トンネルに至っては、自動車そのものが火源で

あり可燃物である。従って、地下施設においては万全の火災発生防止対策を施すとしても、火災は発生する可能性があることを前提に、早期発見、被害拡大防止対策などの防災対策を策定する必要がある。

地下施設における防災対策として重要なことは、オペレータが対処（判断）するためにも、防災基本コンセプトを明らかにしておくことである。例えば異常時に直ちに地表避難か避難所退避あるいは積極的な異常状態の解消（消火活動など）かと言った判断は、地下施設の用途、建設時か供用時か、入坑者の数や安全教育・訓練の程度でも異なってくる。

センサによる検知にも誤差や誤作動のリスクがあるため、複数の情報により異常の現状（どんな異常がどこで発生しているのか）を把握しなければならない。また異常状態がどのように拡大（または縮小）していくかを予測することによって、被害を最小限に抑えるための適切な対処が可能となる。これらの情報の把握や予測は、できる限り短時間（2～3分以内）で行われなければ効果が小さくなることが既往の事例において認められている。そして、人的・設備的な被害拡大防止のためには、火災ガスや煙の挙動を制御するための風の流れや圧力の「通気制御」が重要となる。ここで、高温火災では、発生する浮力等により火災ガスや煙が予想外の動きをすることがあることに留意しなければならない。

3. 既存地下施設の情報管理システム事例

ここで、実際の地下施設における情報管理システムの事例を示す。

(1) 土木分野の例

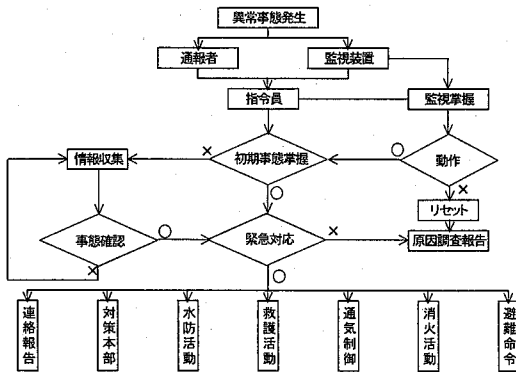
土木分野においては、坑道長も短く構造もシンプルで、災害の発生リスクは鉱山に比べ小さい。さらに大きく異なる要因として、工事そのものが一過性であることである。したがって、情報監視が余り重要視されないのが実態である。そんな中、公共施設として使用されている青函トンネルの情報監視システムの例⁹⁾は、明確な防災コンセプトのもとに作られた供用時の防災システムの一環をなすものと考えられる。

同トンネルは全長 53.85km、海面下 240m の海底トンネルで、主として本坑、本坑と平行して掘削された作業坑、同先進導坑の 3 本のトンネルと北海道の吉岡側と青森県の竜飛側にそれぞれ地表と連絡する立坑、斜坑、ケーブル斜坑から構成される。ここでは、列車火災を想定した防災対策を構築することを目的とし、トンネル両側入口、坑内 2 箇所（海底駅）合計 4 箇所に消火設備を持つ定点を設け、異常が検知された列車は定点まで走行、乗客は地表脱出または避難所まで速やかに避難することを防災コンセプトとしている。

列車に関する情報、火災等の異常情報はリアルタイムに函館指令センターの情報監視システムに伝送、異常の状況により、司令室から遠隔通気制御を行う。通気制御方法としては排煙ファンの運転と共に、送風機の回転速度を上げて斜坑を降下する風量を増加させるとともに、通気の流れ方向を避難所入気側通気門開放により通気ルートを避難所を通して本坑ホームから本坑トンネル中央に向かい、火災ガスと煙と共に作業坑を通して排煙立坑から排出するように変更する。これにより入坑者（乗客）が坑外に脱出するまでの避難ルートの安全区画化を図っている。

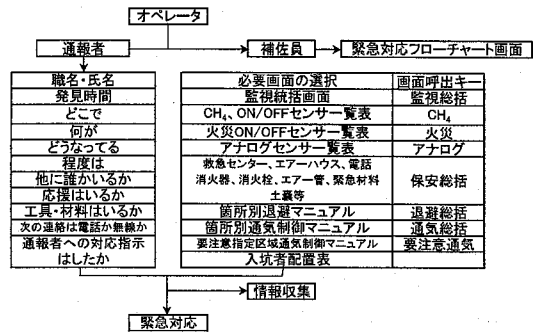
(2) 石炭鉱山の例

石炭鉱山においては、古くから坑内情報の監視システム技術が用いられてきたが、1980 年代初頭、いくつかの大災害が続き、石炭産業の存続をかけて様々な技術開発が進められた⁹⁾。特に管理対象となる膨大な地下施設の安全性、健全性を保ち、災害防止と安定生産を進めながら生産性を高めていくためには、労働集約型（人力型）管理から機械による管理にならざるを得ず、情報管理システムの開発が進められた。例えば三池炭鉱では、坑内の環境及び設備を総括的に監視計測し災害の未然防止に努め、緊急事態発生時には的確・迅速な判断処理、避難誘導を行い災害の拡大防止を図ることを目的とした情報監視システムが稼働していた。平常時はリクエスト機能メニューが表示されており、必要な画面を選択監視するが、異常時には自動的に総括画面に切り替わり、異常発生箇所が色変表示される。さらにライトペンやキーボード操作により詳細情報を表示出来る。図-2 には異常時の基本機能を網羅していると考えられる初期事態掌握マニュアルを、図-3 には緊急対応フローチャートを示す。



出典：炭鉱保安技術要覧

図-2 初期事態掌握マニュアル



出典：炭鉱保安技術要覧

図-3 緊急対応フローチャート

4. 地下施設の情報管理要件

(1) 集中監視と情報管理

煙や異臭など、災害が発生したことによる異常現象が明確な場合は、人間が感知することができる。しかし、長大な坑道網から構成される地下施設の全域を、常時人間が監視し極めて初期の段階で異常状態を発見することはできないため、設備による坑内情報の収集及び管理する総合的なシステムの構築が必要である。

坑内各所に設置された設備やセンサからの情報を、現場から遠く離れた箇所まで伝送し、集中的に監視するのが集中監視である。監視項目の対象としては、単に電気的な ON-OFF 信号や計測値の集中監視のみならず、坑内各所の通気状況やガス濃度、坑内環境、保安状況、切羽設備の稼働状況など多様である。これらの情報は単に監視されるだけでなく、例えばコンベア類の連合運転や非常時の対応など遠隔操作の必要が有る場合もあり、これを集中して行うことにより、少人数による効果的かつ合理的な設備制御が可能となる。このため、情報監視と制御を合わせて、情報管理と称している。従って情報管理システムとは、坑内に設置された各種センサからの情報の収集、地上への伝送、情報処理と情報の統合、集中監視、警報、制御等を含んだ一連のシステムを指す。

(2) 自然条件への対応

地下施設の自然環境の特徴としては、次のものがある。

- ・ 堆積岩系の地層では爆発危険性のある可燃性ガスが存在することがある
- ・ 温度、湿度、粉塵、水等の周辺環境が厳しい
- ・ 落盤等による機械的な衝撃や損傷を受ける可能性がある
- ・ 作業（研究）箇所が随時移動する

システムはこれらの自然環境に関する情報（の変化）を収集すると共に、これらの自然条件に対応したシステム設計が必要である。

(3) 平常時の基本機能

地下施設が具備すべき情報管理システムの基本機能としては、平常時における機能と異常時における機能に分類される。平常時においては、坑内の環境を良好に維持するために必要な情報の収集と処理、監視および蓄積を行うことが基本機能である。同時に異常の検知、制御等に資するための平常時の様々な情報の蓄積も重要な基本機能である。これらの情報は地下施設の規模が大きくなるにつれ、また構造が複雑になるにつれ、情報量と種類が膨大となるため、データベースマネジメントシステム（DBMS：Database Management System）で管理することが適切である。

(4) 異常時の基本機能

万が一異常が発生した時には、異常を早期に検知し、異常の発生箇所とその状況を把握し、入坑者が安全に避難すると共に被害の拡大防止のための措置を取る必要がある。最終的にはオペレータが避難指示や通気制御、消火指示等の判断を行うが、情報管理システムはそのための判断支援の役割を果たすものである。このために必要な基本機能としては、平常時に蓄積された情報と異常情報を分析し、リアルタイム且つ正確な情報群をオペレータの判断に有用に提供することが出来るように、情報の統合化が必要である。

5. 坑内情報管理システムの構築

(1) 対象モデル

今回構築したシステムは、現在建設中の瑞浪超深地層研究所に隣接し、地層研究の場として活用されている原子力機構の東濃鉱山をモデルとして採用した。同鉱山では、情報管理システム構築に必要な情報である気象データや坑内環境データを継続的に計測しているほか、マンロケーションデータも、整備されており、そのシンプルな坑内構造と相まって、プロトタイプシステム構築に適切な条件を具備していたためである。

(2) 構築システムの特徴

今回構築したシステムの特徴は、GIS による情報統合化機能と分析機能を活用したことである。従来の情報監視では、各種センサや数値解析結果等が独立して処理され、オペレータに供されていた。本システムにおいては、センサ情報と数値解析結果を比較し、得られた異常データとマンロケーションによる位置情報を GIS 上で重ね合わせ、GIS の分析機能により最も危険度の小さい避難ルートを検索して表示するものである。すなわち、図-4 に示す通り、システムを中心にツールとしての GIS を据え、周辺に配置した各機能エンジンを GIS が統合する構造とした。今回の開発に用いた GIS ソフトには、ESRI 社の ArcGIS Ver8 を採用した。

なお、本図では情報量が増大した場合に必要な DBMS を組み込んでいる。

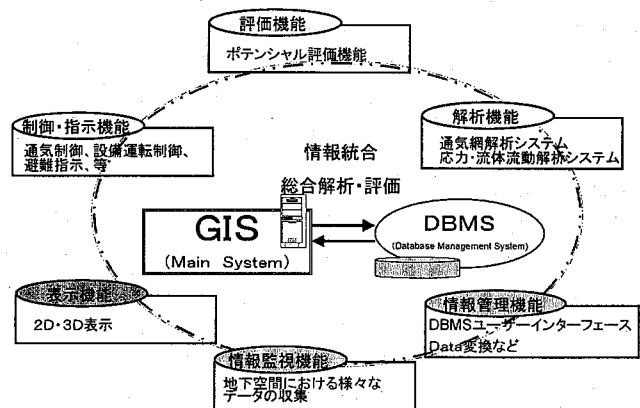


図-4 情報管理システムの概念

(3) 基本機能とシステム構成

坑内情報処理の基本機能を兼ね備えた情報管理システムは以下の項目から構成される。

a) 情報検知・処理系

- ① 各種センサによる坑内環境などの検知、伝送
- ② 受信データの処理・蓄積および監視

b) 解析・分析系

- ① リアルタイム通気網解析による坑内環境予測と、センサ情報との比較による異常判断、警報
- ② 異常発生時の坑内環境から異常発生箇所の特定、火災時解析による異常状態の将来予測
- ③ 最適通気制御の検索
- ④ マンロケーションによる位置情報重ね合わせによる入坑者（グループ）避難ルート分析

c) 操作・表示系

- ① 各種センサによる坑内環境などの表示（坑内 3 次元表示、トレンド表示など）、入坑者位置表示
- ② 異常状態および予測の表示
- ③ 避難ルート、最適通気制御等の解析・分析結果表示

④ データ管理、画面制御などのマン・マシンインターフェース

d) 制御系

- ① 通気設備の最適制御指示
- ② 自動消火設備稼働指示

(4) 情報検知機能

情報検知に必要なセンサの種類と設置箇所を記すと以下の通りである。

a) 火災発見用

- ・ 一酸化炭素センサ：主要排気坑道、火災発生源となり得る機械設備類付近
- ・ 温度センサ：稼動設備の原動機軸受け部
- ・ 煙感知器：一酸化炭素センサとの連動

b) 坑内環境・異常監視用

- ・ 風速・風向・温湿度センサ：坑内主要通気回路
- ・ 差圧センサ：主要風門

c) 入坑者管理用

- ・ 入昇坑管理：昇降設備のある坑口
- ・ マンロケーション：入坑者全員又は引率担当者

具体的には、地下施設の坑道配置、設備配置等を考慮して、必要な箇所（最も適切な箇所）にセンサを配置し、地上にて集中的に監視するシステムとする必要がある。

(5) 解析・分析系

a) 異常検知機能

通気網解析結果と坑内通気センサからの計測データを比較することで坑内の異常を検知するシステムである。比較の対象となる計測データは、風量（風速）、温度、湿度、絶対圧力があるが、ここでは最も取り扱い易い風量を対象とした。ただし、風量データは変動幅が大きく比較精度が悪くなるため、現実にはCO、煙、温度、圧力、湿度も認識順位をつけて異常検知回路に組み込んだ。解析は気象変化と設定した時間ごとにリアルタイム通気網解析を行い、計測データとの比較によって異常が検知された時に、計測値を坑内異常箇所と原因特定を行うシステムに送り込む。

b) 異常箇所特定機能

センサが設置されている通気回路で異常が発生した場合の風量変化パターンを、事前に異常状況毎にシミュレーションした異常状況パターンデータベースの風量と比較し、最も良く一致したパターンから異常発生箇所を想定する異常検知サブシステムである。シミュレーションは通気網解析のうち火災時解析^{7), 8)}の手法を用い、異常検知機能によって推定された火災発生箇所と火災温度から延焼箇所と時間を予測する。図-5に火災時解析モデルと解析例を示す。

c) 通気制御方法検索機能

火災が発生した時に入坑者の避難ルートと避難時間を確保するためには、通気制御が効果的である。通気制御は主要ファンの運転/停止/逆転、局部ファンの運転/停止、および風門の開閉からなり、火災ガス排出（排煙）ルートや圧力を制御する方法である。通気制御方法は火災発生箇所等によって異なるので、事前に数値解析により最適通気制御方法を求めておき、異常箇所特定機能で得られた情報から検索する。

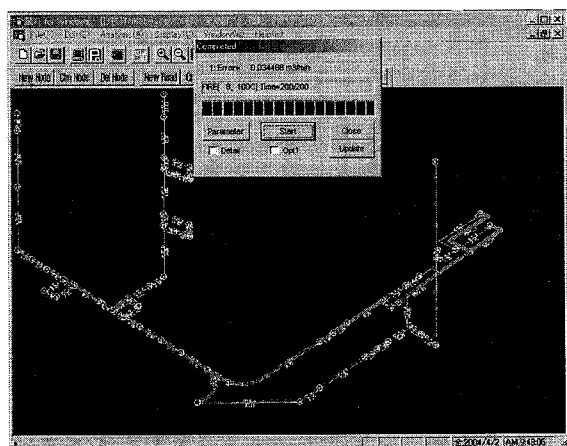


図-5 解析モデルと火災時解析例

d) 避難ルート分析機能

本システムは避難ルート分析機能を具備する。最適避難ルート分析は坑内における火災などの災害発生時に、オペレータが入坑者を地上または退避場などの安全な場所へ最も危険度の低いルートで誘導するための意志決定を支援するためのシステムである。本システムはGISの分析機能を活用し、避難の出発点と到達点をあらかじめ想定してルートごとの危険度を算出、評価する。図-6に最適避難ルート分析概略図を示す。退避ルートの危険度は、以下のパラメータで決定することとした。

- ・火災ガスの危険度：火災ガスの危険性は井上⁹⁾のデータを参考に有害ガス濃度、および火災ガス温度により評価する。有害ガスによる評価値は、人間が任意の坑道の通過に要する時間を求め、その時間に一酸化炭素(CO)を吸入した場合の血液中のCO濃度を計算した。また火災ガス温度による危険度は、温度に関する許容時間で評価した。
- ・経路の通行難易度：避難経路の状況も避難ルート選定の際の要因となる。危険度の評価は経路中に障害となる要因があれば危険度が高くなり、障害要因が無いか、もしくはほとんど通行の妨げとならなければ危険度は低くなる。
- ・距離：基本的に距離は長いほど危険度は高くなる。
- ・疲労：同じ経路を避難する場合でも、避難者の疲労によって危険度は高くなる。

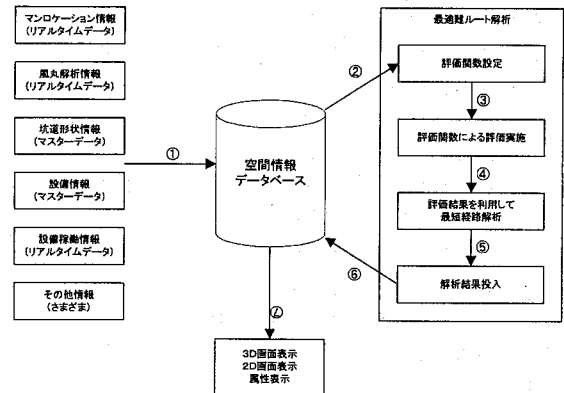


図-6 最適退避ルート分析概念図

(6) 操作・表示系

本システムの主な操作はGUI(Graphical User Interface)により行う。GUIはArcGISのグラフィック機能を用いている。本システムのGUIは状況や解析結果の表示や主な操作を行うメイン画面と管理者情報や坑道情報などのマスター情報を入力・編集などを行うデータ管理画面の2種類に分類される。

a) メイン画面

メイン画面は常時表示されている画面で各センサからのデータや外部解析システムの解析データなどを表示するもので、メニューバー、状況表示、システム状況、3D状況表示、情報コントローラー、情報表示により構成される(図-7参照)。3D状況表示は3D坑内モデル上に情報コントローラーにより選択された項目に関するデータを表示する。表示項目としては、坑内センサ・坑外センサ位置のほか、リアルタイム熱環境解析結果(解析風量や温度毎に異なる色で表示)、マンロケーション位置(グループ毎の位置-PHSの受信アンテナ設置位置)、火災時解析結果とグループ毎の避難経路(情報ウィンドウにはグループ毎に危険度の少ない順でルートを表示)等を表示することとした。また情報表示には、情報コントローラーで選択された項目に関連するデータがテキストおよびグラフにより表示が可能である。

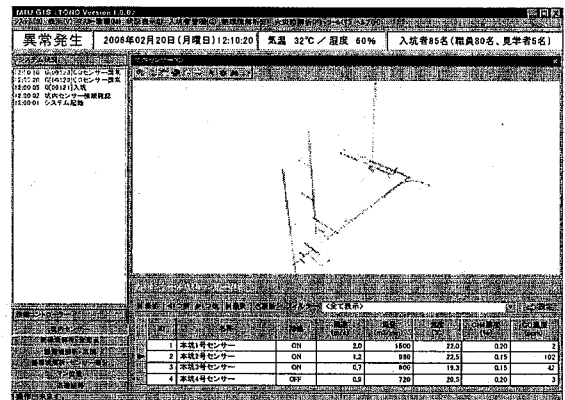


図-7 メイン画面-坑内環境表示の例

b) データ管理画面

データ管理画面は、データベースへのデータの追加や削除並びに編集という作業を直接データベースのテーブルを操作することなく、視覚的にデータ管理ができるように準備した。データ入力画面は社員名や坑道

情報などのあらかじめシステムに登録する固定情報を入力編集するマスター画面と、入坑者情報などの変動データを入力・編集する管理画面から構成される。

6. まとめと今後の開発課題

石炭鉱山においては、その歴史が古く労働集約型産業であったこともあり、幾多の災害を経験し、その経験をもとに情報管理技術が発達してきた。特に自然条件を相手にしており、また長大かつ複雑な坑内構造を有し、石炭鉱山の近代化に伴い様々な重機械類が坑内に設置されるにいたって、平常状態における坑内の環境監視と異常の早期検知が安定した生産の前提となる保安の確保にとって極めて重要であったためである。

しかしデータの異常をどのように評価するかは人の経験や技術に負うところが多く、このことは、災害の発見の多くがセンサ異常検知によるものより巡回者等により見いだされていたと言う統計データが示す通りである。然るに昨今、我が国の鉱山業の衰退と共に経験深い技術者が失われつつあり、今後益々発展が期待される地下空間利用へのこれらの地下管理技術の活用のためには、情報管理技術のコンピュータ化が急務と考えられる。

これらの背景のもと、筆者らは地下施設における情報管理のあり方について、土木分野の地下施設や石炭鉱山の実例を調査し、情報管理システムの要件を抽出、東濃鉱山のデータを活用してプロトタイプシステムを構築した。システムは、坑内外のセンサデータを取り込み処理する情報検知・処理系、リアルタイム通気網解析で求めた坑内環境のあるべき姿と現場データを比較して異常を検知し、異常箇所を特定し、火災時解析結果とマンロケーションデータから入坑者（グループ）の最適避難ルートを検索する解析・分析系、オペレータや防災管理者に状態や予測結果を示すと共に、入出力インターフェースとなる操作・表示系から構成される。

システムの課題としては、以下のものが考えられる。東濃鉱山は比較的小規模な地下施設であり、監視測点数も少なく、可燃性ガス等の湧出もない。これが深地層の研究施設や、地下発電所、地下貯蔵施設などの大規模な土木地下施設においては、自然環境に関するデータ量も多く、坑内構造も複雑となる。従って DBMS によるデータベース管理の強化が重要となる。またシステムの構成やコア機能は基本的に同じでも、対象とする地下施設毎に自然条件や用途、坑内構造が異なるため、それぞれの地下施設に対応する機能とデータベースを備えたシステムにカスタマイズする必要がある。その他、ソフト開発にかかるコストや時間、特に建設時の変化する坑内構造へのモデルの対応、複数のエンジンから構成されるシステム全体の信頼性向上、システム要員後継者育成等の課題もある。

自然条件の影響の大きい地下施設への情報管理システムの導入は進んでいないのが現状である。本研究はそれへの対応策として、人間の持つ知識と経験をシステムの機能として組み込むことで普遍化することを試みたものである。長年に亘って培われてきた地下管理技術やノウハウをシステムに組み入れることは容易ではないが、ヒューマンエラーの撲滅の観点からは、緊急時に膨大なマニュアルをめくることなしに画面上で操作可能な電子防災マニュアルの構築が、情報管理システムの機能を発揮するために効果的であると考えられる。筆者らはこれらの課題解決を目指し、さらに研究を続けていく所存である。

参考文献

- 1) 坂井哲郎, 萩原育夫, 佐藤稔紀, 見掛信一郎: 深地層の地下研究施設における通気・防災上の検討, 資源・素材 2003 (春季大会), pp.114-115, 2003.3.
- 2) 核燃料サイクル開発機構: 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成 17 年取りまとめ- 分冊 1 深地層の科学的研究, JNC TN1400 2005-014, pp.(5-1)-(5-25), 2005.
- 3) 鉱業労働災害防止協会: 石炭鉱山保安統計集, 1985.
- 4) 坂井哲郎: 地下開発における防災のあり方と通気技術の活用, 月刊技術士, 技術士 13・3, 2001.
- 5) JR 北海道函館支社: 青函トンネルパンフレット.
- 6) 財団法人石炭技術研究所・社団法人資源・素材学会: 炭鉱保安技術要覧 (第 8 編 坑内監視システム), 1992.
- 7) 井上雅弘, 内野健一: 坑内火災ガス温度の予測について(1), 資源と素材, Vol.119, No.12, pp.727-733, 2003.
- 8) 井上雅弘, 内野健一: 坑内火災の影響を考慮した通気網解析(2), 資源と素材, Vol.120, No.2, pp.112-117, 2004.
- 9) 井上雅弘: 通気網の解析と掘進切羽の通気, 資源と素材, Vol.116, No.2, 2000.