

「石炭鉱山保安技術の開発」  
—— 鉱山保安政策への活用と海外への研究展開 ——

井清 武弘<sup>1</sup> 元資源環境技術総合研究所  
Takehiro Isei

## 要 旨

石炭鉱山保安を左右する事象は極めて多岐にわたっている。また、それらの事象は自然地质条件等の要因に結びついていることも少なくなく、研究で再現させ、その本質を研究していくことが困難な事象も数多くある。このような条件の中、筆者が関係した試験炭鉱の実規模試験坑道を使用した炭じん爆発と坑内火災の研究についてその成果とそれらが炭鉱保安行政や現場に反映された経緯の一部を紹介するとともに、それらを中心としたベトナムや中国などとの国際技術協力や研究協力についても紹介する。

## 本 文

### 1. はじめに

特別研究として行われた「鉱山保安技術に関する研究」は、工業技術院で実施された特別研究の中でも最長不倒ではないかと思う。筆者が昭和 41 年に資源環境技術研究所の前身である資源技術試験所に入所したときには、「鉱山保安技術に関する研究——ガス・炭じん爆発」として既に推進されていたと記憶している。以降、平成 2 年度に終了した「鉱山保安技術に関する研究——火災対策と退避システム」まで、筆者が研究所に入所以来 25 年間継続したことになる。この間、石炭鉱山における多様な事象や問題が研究対象とされてきた。

また、工業技術院の特別研究に加えて、石炭保安政策の担当原課であった当時の石炭保安課から石炭・石油特別会計から「鉱山保安技術研究」として予算が研究所へ回付され、昭 40 年代半ばから平成二年度まで約 20 年にわたり研究が継続された。この予算措置は、炭鉱保安対策に関する研究が行政当局の期待と深く結びついていたことを示すものであろう。

筆者は、昭和 40 年に連続して発生した三件のガス・炭じん爆発とそれに引き続く坑内火災（2 月：夕張炭鉱、4 月：伊王島炭鉱、6 月：山野炭鉱）に対応するため、急遽行われた閣議決定に基づく一般会計の予備費からの支出により施設が強化された試験炭鉱の強化要員として研究所に入所した関係で、研究所に加わると同時に石炭鉱山保安技術研究に携わる

---

<sup>1</sup> ベトナム国営石炭・鉱物産業企業体(VINACOMIN) 鉱山科学技術研究所アドバイザー

こととなり、22年間試験炭鉱で実規模実験を中心とした研究に関わってきた。

これらの研究の他、筆者が研究所に入所して以降も炭鉱で重大災害が発生した。研究所に入所した昭和41年4月以降、10名以上の死亡者が出た炭鉱重大災害が19件発生している。これらのうち最大の事故は、いずれも83名の死亡者を出した夕張新鉱におけるガス突出とガス爆発事故と三池炭鉱有明坑における坑内火災事故である。これらの重大災害の発生に当たっては事故調査委員会が組織され、研究所からも委員が参加し、原因究明と共に原因推定や再発防止策の実験や調査が行われることが度々あった。このような行政や炭鉱現場との深い関係も研究活動の延長として特異な点といえよう。

本稿では、筆者が関係してきた研究活動や委員会活動と行政との協力また国際協力などについて紹介したい。

## 2. 鉱山保安研究の特異性

「鉱山保安研究は、『後追い研究』である」と常々言われてきた。つまり、事故の発生を受けて研究が開始される、という指摘である。研究所にいた現役時代はこの指摘に後ろめたさを感じてきたが、ベトナムにおける研究・技術指導に専念している現在、石炭鉱山保安を左右する事象の特異性に改めて気がつき、「後追い研究もやむなし」、という所感をもつに至っている。

鉱山保安法が施行された昭和24年以降、10名以上の死亡者を出した我が国の炭鉱における重大災害の事故内容を第1表に示す。発生回数ではガス爆発が圧倒的に多いが、発生一回あたりの死亡者数で見ると炭じん爆発が群を抜いている。

第1表： 我が国の炭鉱における10名以上の死亡者を出した重大災害

事故内容	ガス爆発	坑内火災	坑内出水	ガス突出	炭じん爆発	自然発火	落盤	ボタ山崩壊	総計
回数	39	7	7	4	1	1	1	1	60
死亡者数総計	1,011	248	209	141	458	14	15	73	2,169
一回あたり死亡者数	27	35	30	35	458	14	15	73	36

事故防止の観点、つまり、保安行政を実行する立場からは、下記の点が必要である。

- (1) 事故の予見
- (2) 事故の原因排除
- (3) 事故の教育と再発の最小化
- (4) 事故に対する許容リスクの普遍化

炭鉱事故とその防止を目的とした研究を行う観点からは、下記への取組が必要である。

- (1) 事故につながる事象の予見の方法
- (2) 事故につながる事象の実験研究的再現とその本質の解明

### (3) 事故の防止対策と相対的発生の最小化の方法

研究上の観点からも保安行政の観点からも重大災害に関わる事象の「予見」が必須である。しかしながら、炭鉱保安にかかわる事象の予見という観点から見ると、「何が (what) ?」、「何時 (when) ?」、「どこで (where) ?」、「誰が (who) ?」、「何故 (why) ?」、「どのよう (how) ?」発生するかが正確に予見されなければ実際的な対策は行えない。

また、研究を行う上からは、模型であれ実規模であれ炭鉱保安にかかわる事象を実験的に再現することが必須である。実験的な再現により事象を支配する要因の解析が進み、その結果、事象の防止やリスクの最小化のヒントが得られる。

しかしながら、炭鉱の場合人工的支配要因の他に「自然・地質条件」という複雑な外的要因があり、「地震予知を正確に行うことが極めて難しい」と同様に、漠然とした予見は可能であっても、5W+1Hをともなった予見をすることはほとんど不可能に近い。

また、炭鉱保安管理を左右する事象について、実験的に再現できるものは限られている。例えば、ガス爆発や炭じん爆発については実験的に再現できるようになっているが、「ガス突出」などについては規模の大きさや関係要因の多さで実験研究的に事象を再現することは不可能である。このため、ガス突出の発生が炭鉱の閉山につながった昭和56年(1981年)10月16日の夕張新坑の例のように、お手上げ状態の事象も発生するのが炭鉱で発生する事象の特質であるといえる。似たような事象としては重大災害となった例は少ないが、「山はね」なども予見や再現の双方から極めて難しい状況である。

自然発火などについても現場条件と同じ条件での再現が極めて難しい状況で、人工的な断熱環境をつくり出し、その環境下で石炭試料の酸化発熱を調べる装置なども使われているが、これらの実験条件は現場条件とはほど遠い状況で、本質的な自然発火の発生メカニズムの解明には至っていない。

炭鉱保安管理を支配する事象は、すべて「自然要因」と深く関わっており、関係要因を人工的に支配できるその他の工学的研究とは大きく異なるのが炭鉱保安研究の特異性である。

## 3. ガス・炭じん爆発対策

ガス・炭じん爆発事故は、我が国だけではなく国際的に見ても極めて古くから発生している。報告されている死亡者がおおむね300人以上の事故を整理すると、**第2表**<sup>1)</sup>のとおりである。

表から明らかなように、我が国でもガス・炭じん爆発の歴史は古く、明治39年(1906年)に遡る。第2表に示されたほか、我が国では戦前(1945年まで)に100名以上の死亡者を出したガス・炭じん爆発事故が14件も発生している<sup>1)</sup>。

このような事故の多発にともない、当時の中心的な産炭地であった福岡県の筑豊石炭鉱業組合から農商務大臣宛に「鉱山変災調査機関設立ニ関スル請願」が提出され、これが契機となり福岡県直方市に「安全燈試験場」(資源環境技術総合研究所九州センターの前身)が大正4年5月に設立され、一年後の大正5年5月に農商務省直轄機関となった。

第2表 各国のガス・炭じん爆発（死亡300人以上）<sup>1)</sup>

年	月	日	国名	炭鉱名	死亡者数
1866	12	12	英国	オークス	361
1906	3	10	フランス	クーリエ	1,099
1906	3	28	日本	高島	307
1907	7	20	日本	豊国	365
1907	12	6	米国	モノガー	361
1908	11	12	ドイツ	ラドボールド	360
1910	12	21	英国	プレトリア	344
1913	12	8	英国	セングヘニーズ	439
1914	11	28	日本	若鍋	423
1914	12	1	日本	臼威	422
1914	12	25	日本	方城	687
1917	1	11	中国	撫順大山坑	917
1917	12	21	日本	大之浦	369
1920	10	14	中国	開灤	431
1940	5	22	中国	井陘	341
1942	4	26	中国	本溪湖	1,527
1942	10	11	中国	西安泰信一坑	310
1962	2	7	ドイツ	ルイゼンタール	299
1963	11	9	日本	三池	458

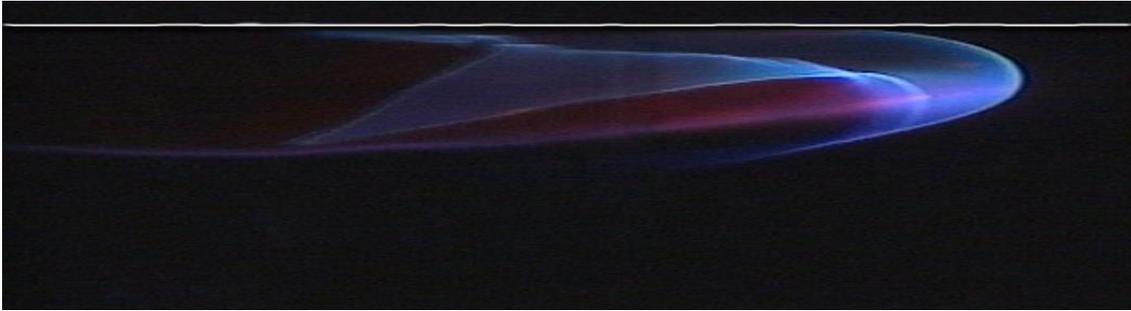
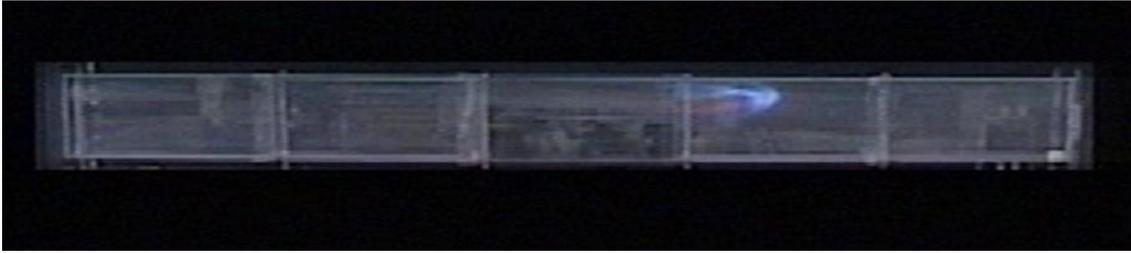
### (1) メタンガスの燃焼・爆発の研究

この安全燈試験場では、メタンガスの検知・測定、メタンガスの爆発メカニズム、電気機器の防爆などの研究が中心に行われ、戦後の炭鉱で普及したメタンガス検定器、防爆電気機器の基盤などが確立された。

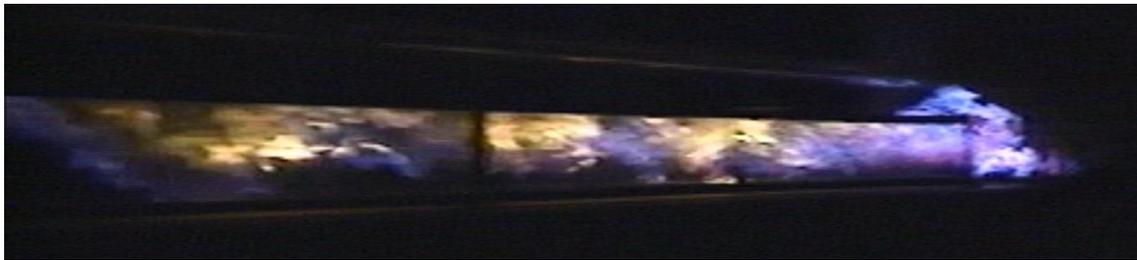
これらに加え、炭鉱開発が九州地区だけではなく、宇部地区、北海道地区、常磐地区などに拡大し、また、炭鉱が深部化してメタンガス発生量が多くなると、メタンガスを希釈して爆発限度以下に維持する通気技術の研究や高濃度メタンガス滞留したときの事象の研究が必要となり、我々が関わった研究では、メタンガスレーヤーの燃焼・爆発などが行われ、静止メタンガスレーヤーの燃焼・爆発、流動メタンガスレーヤーの燃焼・爆発などが行われ、それらの特性明らかにすることが出来た。

メタンガスは、対空気比重が0.55で、炭層などから高濃度メタンガスが継続的に湧出した場合、天盤側にレイヤーが形成される、これが何らかの原因で着火されると、第1図に示すように、通気がない場合は、着火点からレイヤーの延長方向へ静かに燃焼していく。

一方、実際の炭鉱現場では通気が停止していることはなく、常に通気流がある中で、メタンガスレーヤーが形成される。このような条件で急速なメタンガス湧出があった場合、第1図の様相とは全く異なった現象となる。その一例を第2図に示す。



第1図 模型坑道における静止メタンガスレーヤーの燃焼（上：全体図、下：拡大図）<sup>2)</sup>



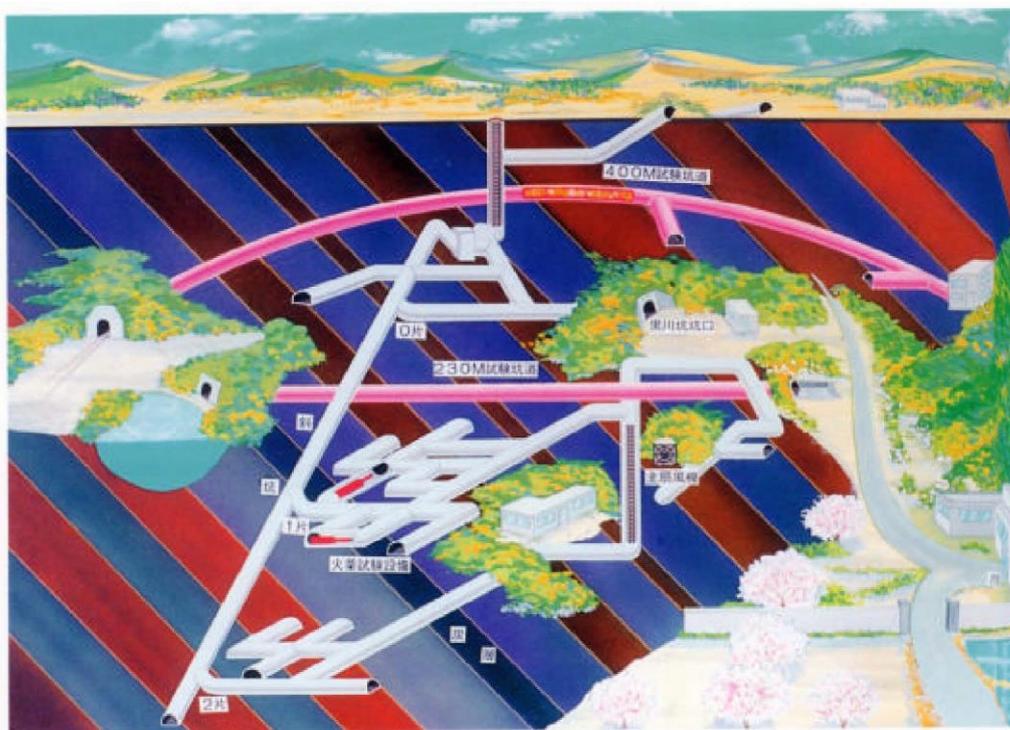
第2図 通気流中におけるメタンガスレーヤーの燃焼（上）と爆発（下）<sup>2)</sup>

坑道が平滑な場合、第2図の上図に見られるように、着火点から通気を遡って燃焼火炎が進行していく。一方、第2図の下図に示されるように、坑道が変形し通気に乱れが発生するような箇所があれば、メタンレーヤーと通気が混合され、燃焼状態から、いきなり爆発状態となり、メタンガスが湧出（突出）した箇所からはるかに風上まで入気側に爆発火炎が遡及する。これらの現象は、南大夕張炭鉱で発生したガス突出後の救助作業中に関係者が罹災した事故の事象（1979年5月）を裏付ける研究成果である。

ガス爆発の研究は、メタンガスと空気が均一に混合された場合の研究がある時期まで主流であったが、炭鉱が深部化・奥部化する中でメタンガスの湧出（突出）状況と通気の動的な相対関係をにらんだ研究展開が図られ、事故原因の究明や再発防止策に利用されることとなった。

## (2) 炭じん爆発に関する研究

ガス爆発が小型装置から実規模まで比較的安定した研究が戦前から進められてきたのに比較して、炭じん爆発の研究は、一部の実験室における研究を除き、実際的な炭じん爆発伝ばの研究は、昭和28年に試験炭鉱が設立され、230m爆発試験坑道（断面積3m<sup>3</sup>）が設置され、また、昭和40年の一般会計予備費からの支出による施設増強の一貫として400m爆発試験坑道（断面積6m<sup>3</sup>）設置され、実規模坑道による炭じん爆発実験が行われるようになって、飛躍的に研究が進捗した。拡充された試験炭鉱の概要を第3図に示す。

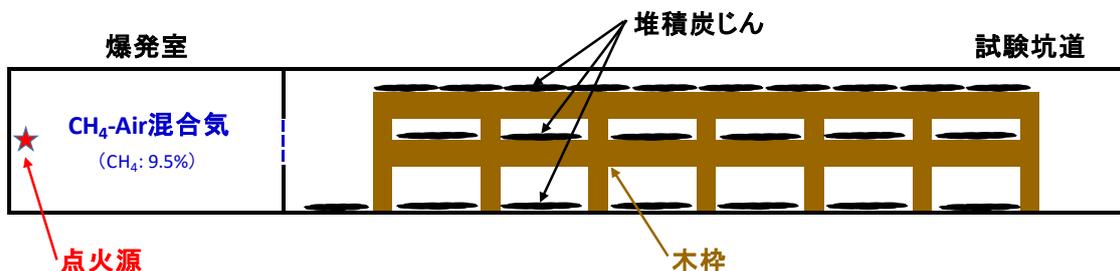


第3図 試験炭鉱に設置された地下試験坑道の概要  
(赤：爆発・火災試験坑道、白：一般試験坑道)

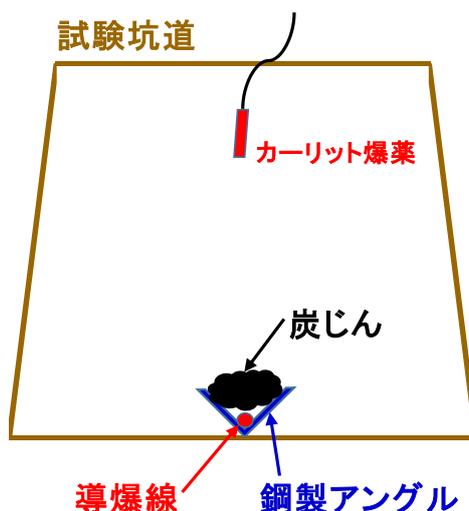
模型坑道や実規模試験坑道における炭じん爆発伝ばに関する研究を行う場合、炭じん爆発を再現性良く発生させ、各種条件下における爆発伝ば特性を調査する必要がある。炭じん爆発伝ばを支配する主な要因は、下記の通りである。

- ✓ 炭じん： 揮発分、粒度、水分、堆積状況、など
- ✓ 坑道条件： 断面積、施柵状況、介在施設、など
- ✓ その他： 通気状況、気温、湿度、など

上記の各要因が炭じん爆発の坑道内伝ばを支配するが、これらの影響を調べるため、炭じん爆発を安定して実験的に再現させる必要がある。炭じん爆発を実験的に発生させる方法として、炭鉱現場と同様に、試験坑道内へ試料の炭じんを堆積させた状態で、メタンガス爆発を発生させ、その圧風と火炎で堆積した炭じんを浮遊・着火する方法が基本的な一つの方法で古くから試みられてきた。その概念を第4図に示す。



第4図 炭じん爆発伝ば実験の概念(1) ——堆積炭じん+メタンガス爆発



第5図 炭じん爆発伝ば実験の概念(2) ——炭じん強制浮遊式

第4図に示した堆積炭じん方式は、手間がかかる上、実験毎のバラツキも大きく、発生する炭じん爆発伝ばの状況も爆発伝ば速度が、数十 m/s から、1,800 m/s の極限的な爆轟状態まで大きく変化する<sup>3)</sup>。

炭じん爆発伝ば防止技術などの研究を行う場合、再現性の良い炭じん爆発を繰り返し発生させる必要があり、**第5図**に示すような炭じん強制浮遊式が考案された。この方法は、坑道の床に坑道の延長方向に設置した鋼製アングルの底に爆速が 6,000 m/s の導爆線を設置し、その上に坑道空間に所要の浮遊炭じん濃度（数十 g/m<sup>3</sup>～数百 g/m<sup>3</sup>）となるように計算して計量した炭じんを入れる。浮遊した炭じんの着火源としては、メタンガス爆発の代わりにカーリット爆薬 100 g ないし 200 g を用いる。

実験では、まず瞬発電気雷管で導爆線を起爆して坑道空間に炭じんを浮遊させた後、300 ms の遅発電気雷管を装着したカーリット爆薬を起爆して、浮遊した炭じんを点火して、爆発伝ばを発生させる。この方法であれば、比較的再現性の良い爆発伝ばを発生させることが出来、準備も堆積炭じん方式に比較して簡便である。この方式で発生させた空中炭じん爆発と 400 m 爆発試験坑道における炭じん爆発が坑口まで伝ばした様子をそれぞれ**第6図**と**第7図**に示す。



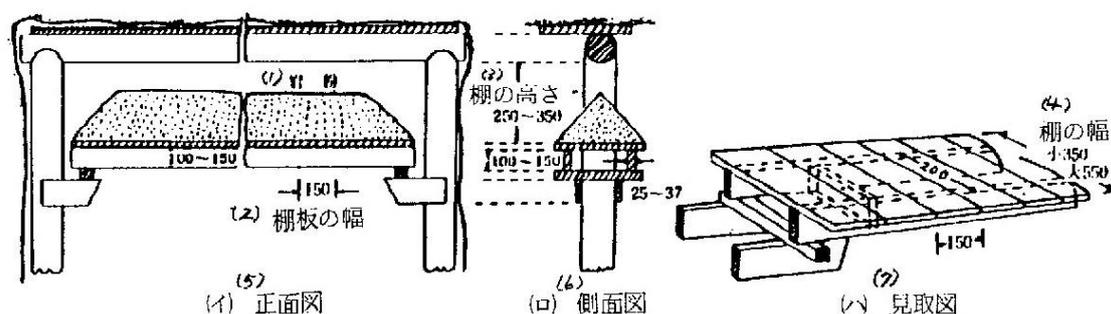
第6図 強制浮遊方式による空中炭じん爆発



第7図 強制浮遊方式による 400m 試験坑道における炭じん爆発

昭和 38 年 11 月 9 日に三池炭鉱三川坑で発生した炭じん爆発では 458 名の死亡者を出した。調査結果から死亡者のうち爆発の直接的衝撃で死亡したのは 20 名で、残りの 438 名は、入気の石炭運搬斜坑で発生した爆発にともなう一酸化炭素が坑内各所に通気で運ばれ、一酸化炭素中毒による死亡であった。この反省から、発生した炭じん爆発を即座に中断させれば、発生する一酸化炭素の量を減らすことが出来、被害者を減少させることが出来ると考えられた。

従来、炭じん爆発の伝ばを防止する方法は、ポーランドで開発された岩粉棚方式であった。これは、第 8 図に示すように、坑道の天盤側に爆発の圧風で転覆するような構造の岩粉を搭載した棚を設置するもので、実規模試験坑道（第 9 図）を使用してその有効性が確認され、世界的に普及していた。



第 9 図 ポーランド式岩粉棚の概要



第 9 図 ポーランド・バーバラ試験炭鉱の爆発試験坑道  
(この坑道を使用して炭じん爆発伝ば防止用岩粉棚が開発された)

この岩粉棚は構造が脆弱で、坑道枠や機材などが混在する狭い我が国の炭鉱現場ではわずかの衝撃で転覆するなど、改善の要望が古くからあった。この岩粉棚に代わり、我が国で考案されたのが、吊し水袋法である。この吊し水袋法も原理的には岩粉棚と同じで、**第 10 図**に示すように、坑道の天盤側に吊り下げた水が入られたビニルターポリン製の袋を炭じん爆発の圧風で転覆させ坑道断面に水を飛散させ、炭じん爆発の火炎を消火しようとするものである。



**第 10 図** 炭じん爆発伝ば防止用吊し水袋 (写真は容量 30 l の水袋)

筆者が、研究所に入り、試験炭鉱に配属されたとき、この吊し水袋の規格を確立するための実験が行われていた。この研究では、下記の要件が試験条件を変化させながら、炭鉱現場に適用できる規格を検討した。

- ✓ 炭じん爆発始発点と吊し水袋の設置位置の間の距離
- ✓ 吊し水袋の構造と設置方法
- ✓ 吊し水袋帯の規格 (坑道断面あたりの水量、水袋の設置間隔、水袋帯の長さ、等)

これらの諸要因の検討の結果、研究成果が当時の石炭鉱山保安規則に反映されることとなった。関係条文を以下に紹介する。

#### 石炭鉱山保安規則

#### 第四章 炭じん 第三節 爆発伝ば防止

##### (普通爆発伝ば防止施設)

**第四百四十六条** 爆発性の炭じんの爆発の伝ばを防止するため、主要運搬坑道 (立坑および水平坑道を除く。)、坑内作業場の出入口附近その他必要な箇所 (第四百四十七条の規定により特別爆発伝ば防止施設を設ける箇所を除く。) には、次の各号の一に該当する爆発伝ば

防止施設を設けなければならない。

一、 坑道の平均横断面一平方メートルにつき〇・一立方メートル以上の岩粉または水を積載する岩粉たなまたは水だな

二、 [濃密岩粉地帯] (略)

三、 [除外規定] (略)

2 [炭じん堆積の希薄な箇所の除外規定] (略)

**(特別爆発伝ば防止施設)**

**第百四十七条** 爆発性の炭じんの爆発の伝ばを防止するため、坑内作業場の出入口附近その他必要な箇所には、坑道の平均横断面一平方メートルにつき〇・四立方メートル以上の岩粉または水を積載する岩粉たなまたは水だなを設けなければならない。

2 [炭じん堆積の希薄な箇所の除外規定] (略)

(岩粉だな等)

**第百四十八条** 岩粉たなまたは水だなは、岩粉または水が飛散したとき坑道横断面の全体にわたるように設けなければならない。

2 岩粉たなまたは水だなはほぼ等間隔に設け、その間隔は、一メートル以上三十メートル以下としなければならない。

3 [濃密岩粉地帯] (略)

注：下線は、研究成果との関係を示すため、筆者による。

上記の石炭鉱山保安規則に基づき、日本の炭鉱における**爆発伝ば防止施設**は、事実上全てが研究所で開発した吊し水袋法になり、これらの研究成果は、国際鉱山保安研究所会議、海外技術協力、JICA 集団研修などを通じて、広く海外へも紹介された。特に、中国に対しては、昭和 58 年度から三年間行われた国際産業技術研究制度 (ITIT) 「炭鉱における炭じん爆発防止に関する研究」<sup>4)</sup>を通じて実規模坑道における炭じん爆発研究を指導する過程で「吊し水袋法」の有効性と限界の調査研究が行われた。

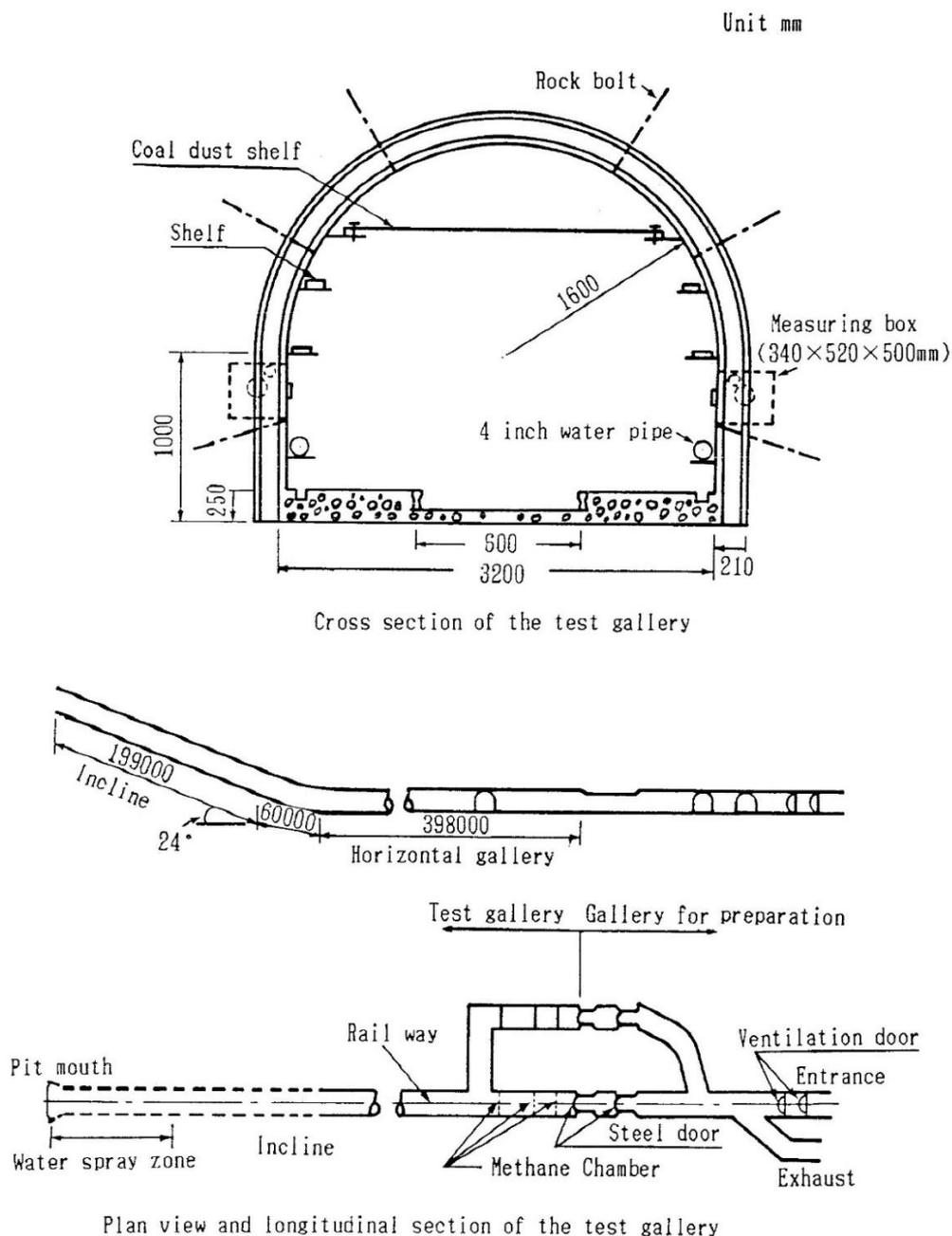
中国の試験炭鉱 (重慶) の爆発試験坑道は、断面積が約 7.2 m<sup>2</sup>、長さが 896 m で、日本の試験炭鉱の爆発試験坑道 (断面積：約 6 m<sup>2</sup>、長さ：400 m) と比較して、断面積が一回り大きく、長さは倍以上ある。**第 11 図**に爆発坑道の概要を示す。この坑道は、始発部にメタンガス爆発室を備えており、炭じん爆発は、**第 4 図**に示した「堆積炭じん+メタンガス爆発」方式を基本的に採用することを前提としている。

この試験坑道を使用して、中国への吊し水袋法の技術移転を目的として、日本の石炭鉱山保安規則**第百四十六条**で採用されている普通爆発伝ば防止施設 (単位坑道断面積あたり 0.1 m<sup>3</sup> (= 100 l/m<sup>2</sup>) の水量) の有効性と限界の調査を行った。

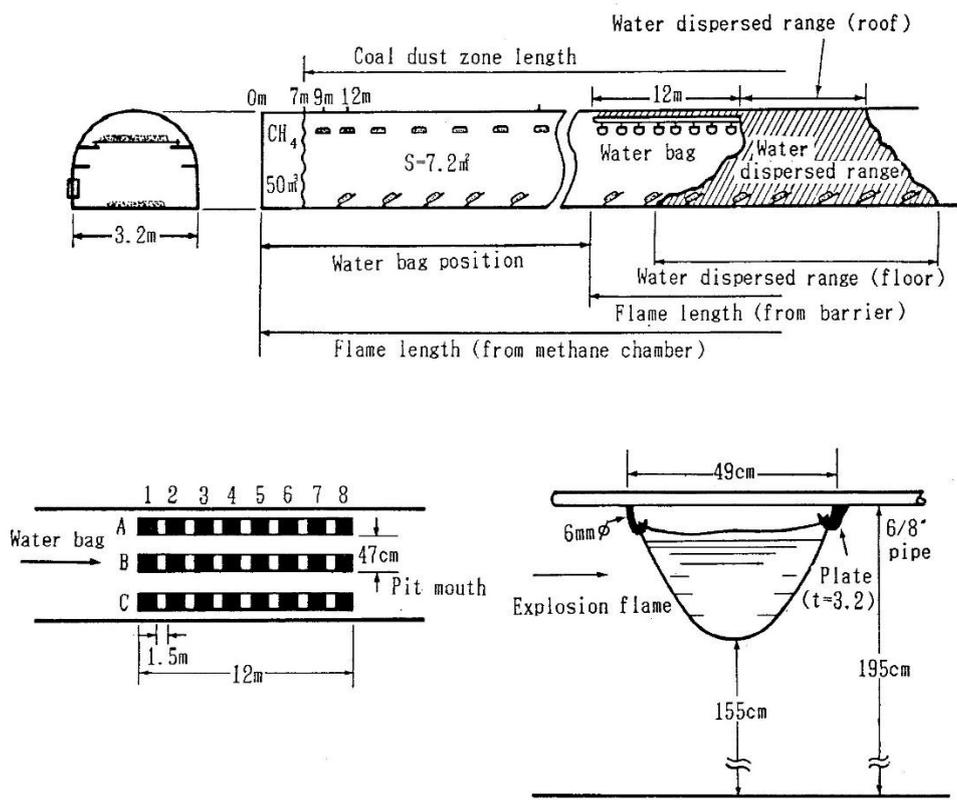
使用した炭じんは、四川渝炭 (揮発分：41.4%、固定炭素：48.8%、灰分：6.9%、水分：2.9%) を 150 メッシュ以下に粉砕したものを使用した。実験ではこの炭じんを坑道単位空間あたり 130~150 g/m<sup>3</sup> になるように坑道の床や枠の上に設置した段ボール板上に堆積させ

た。炭じん爆発は、 $50\text{ m}^3$ のメタンガス室内に9.5%に調整したメタンガス・空気混合気を綿火薬で起爆させ、その圧風で炭じんを浮遊・着火させ、爆発伝ばを発生させた。実験の時、坑道に20 m 間隔で設置した火炎センサーと圧力センサーで爆発の火炎と圧力を観測した。また、アルミホイルを使用して、水袋の転覆の瞬間も観測した。

爆発伝ば防止用の吊し水袋は、このメタンガス起爆室から60 m、100 m、及び、200 mの位置に設置して効果を確認した。水袋は、容量30 lのものを坑道断面方向に3列、坑道延長方向に8列、合計24個を設置した。設置の状況を第12図と第13図に示す。



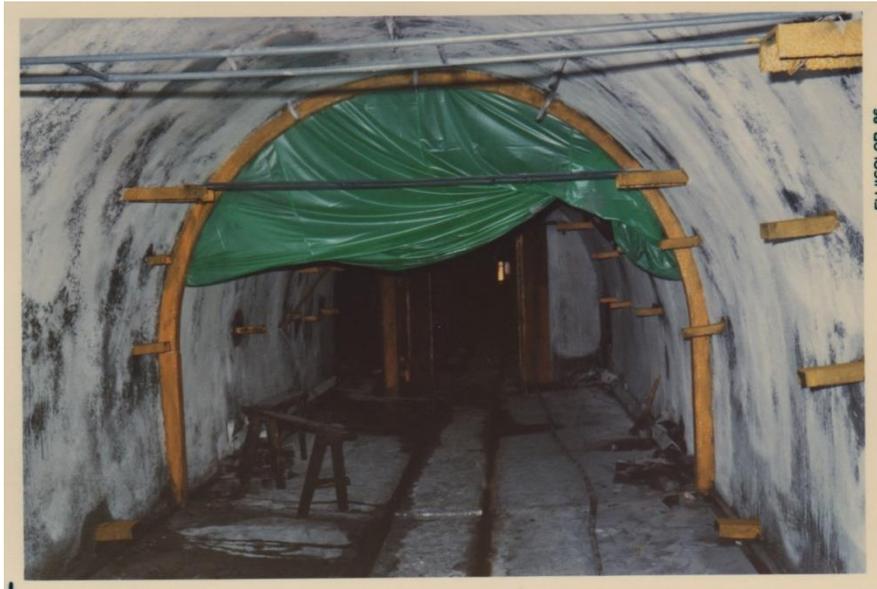
第11図 中国重慶の試験炭鉱爆発試験坑道の概要 (断面積：約 $7.2\text{ m}^2$ 、長さ：896 m) <sup>4)</sup>



第 12 図 炭じん爆発伝ば防止用に爆発試験坑道内に設置した吊し水袋の設置規格<sup>4)</sup>



第 13 図 爆発試験坑道内に設置した吊し水袋<sup>4)</sup>



第14図 メタンガス・空気混合気起爆室<sup>4)</sup>

[メタン・空気混合気を調整する際は、奥部の鋼製扉を閉じ、手前はビニル膜で遮断]

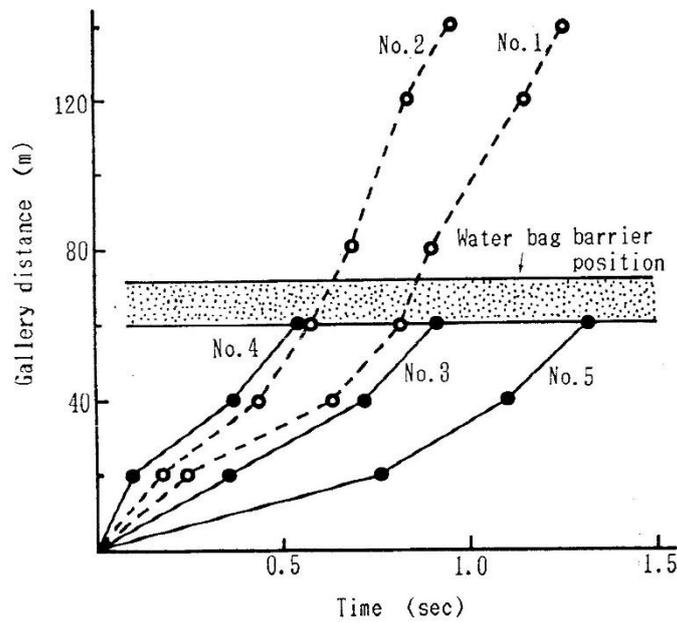


第15図 堆積炭じんの準備<sup>4)</sup>

一連の試験では、炭じん爆発の強度を調整するため、準備した炭じんをそのまま使用して爆発させる場合の他、炭じんに30～40%の岩粉を混合して爆発させ、吊し水袋帯へ侵入する炭じん爆発火炎の伝ば速度を100 m/s～1,000 m/sの範囲で変化させた。爆発後の吊し水袋の様子を第16図、そして、炭じん爆発火炎の時間と坑道位置の関係を第17図（吊し水袋の位置60 m）、第18図（吊し水袋の位置100 m）と第19図（吊し水袋の位置200 m）に示す。図中には坑道距離に対応した吊し水袋の位置を示し、破線は水袋を設置していないとき、実線は水袋を設置したときの結果を示している。



第 16 図 爆発後の吊し水袋の状況<sup>4)</sup>

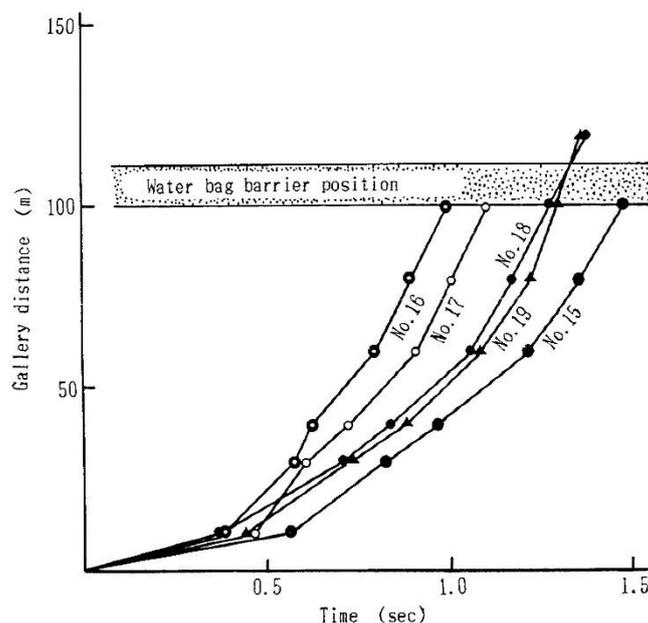


第 17 図 炭じん爆発火炎の時間と坑道位置の関係（吊し水袋の位置：60 m）<sup>4)</sup>

第 17 図は、吊し水袋の位置が起爆点から 60 m の場合で、破線の曲線は水袋を設置しないときの結果で、水袋を設置した場合（●印と実線）は、水袋を設置した以遠では爆発火炎は観測されていない。つまり、三回の実験全てで、吊し水袋により爆発伝ばが阻止された。この時の水袋の直前の爆発火炎の伝ば速度は、100 m/s から 170 m/s であった。

第 18 図は、吊し水袋の位置が起爆点から 100 m の場合の結果で、水袋を設置した五回

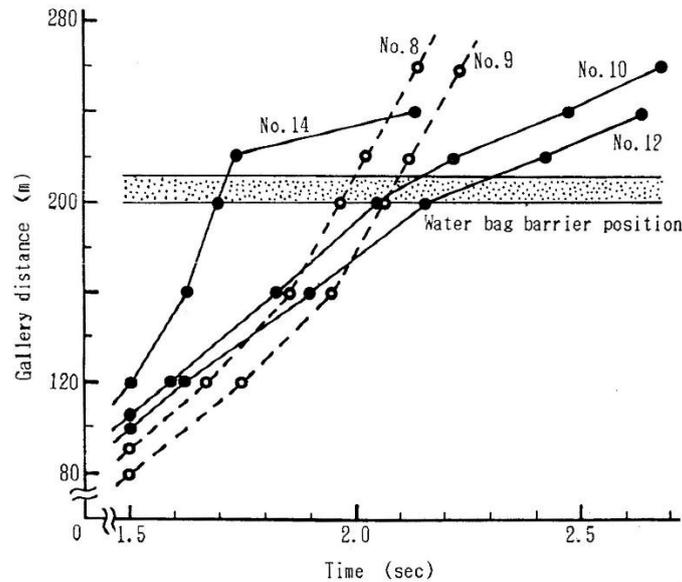
の実験のうち、二回（実験 No. 18 と No. 19）は、水袋を通過した次の観測センサーが火炎を観測しているが、それ以遠には火炎は伝ばしていない。ほかの三回は水袋を設置した以遠では爆発火炎は観測されていない。これらの結果から、起爆点から 100 m の位置に吊し水袋を設置した場合、辛うじて爆発火炎の伝ばを阻止できたと判断できる。



第 18 図 炭じん爆発火炎の時間と坑道位置の関係（吊し水袋の位置：100 m）<sup>4)</sup>

第 19 図は、吊し水袋の位置が起爆点から 200 m の場合の結果で、水袋を設置した三回の実験のいずれの場合も、水袋帯以遠で火炎が伝ばしているのが観測されている。つまり、この実験条件では、普通爆発伝ば防止施設（単位坑道断面積あたり  $0.1 \text{ m}^3 (= 100 \text{ l/m}^2)$  の水量）では、炭じん爆発の伝ば阻止は出来ない。この一連の実験では三回の実験で、火炎伝ば速度が音速と同等か音速を越える爆轟状態が観測されている。観測された火炎伝ば速度は、実験 No. 8 が  $540 \text{ m/s}$ 、実験 No. 9 が  $320 \text{ m/s}$ 、そして、実験 No. 14 が  $1,052 \text{ m/s}$  と極めて大きな爆速を観測している。実験 No. 14 では爆発圧力も  $6.8 \text{ kg/cm}^2 (0.67 \text{ MPa})$  と極めて高い値を観測している。炭じん爆発は、始発点から伝ばしていく距離が増すに従い爆発伝ば速度が指数関数的に増加し、条件次第では爆轟状態に達することが多くの実験で観測されている。

以上の実験結果から、普通爆発伝ば防止施設は、炭じん爆発の伝ば速度が一定の速度以内で留まると想定される炭じん爆発の始点から 100 m 以内に設置しないと、その効果は期待できない、という結論が得られる。それ以上の距離であれば、石炭鉱山保安規定第百四十八条で規定されている特別爆発伝ば防止施設（水量  $400 \text{ l/m}^2$ ）が必要である。



第 19 図 炭じん爆発火炎の時間と坑道位置の関係（吊し水袋の位置：200 m）<sup>4)</sup>

#### 4. 坑内火災防止対策

第 1 表に示したように、坑内火災による重大災害は、ガス爆発に次いで発生回数が多く、炭じん爆発に次いで発生 1 回あたりの死亡罹災者数が多い。特に我が国の炭鉱は木柵支保坑道が多く、ベルト運搬が中心となってきたこともあり、坑道に連続的に沿った可燃物がある関係で、一旦坑内火災が発生すると、通気により坑道に沿って火災が伝ば延焼する。

第 1 表に示された 7 回の坑内火災のうち、最後に発生した二回はいずれもベルトコンベアが関係する坑道火災で、坑道に沿った延焼火災となっている。特に最後に発生した三池炭鉱有明坑の火災（1984 年 1 月）は、ベルトのキャリアローラーの摩擦がベルトの貫通している通気制御用の箱型通気門内に堆積した落下炭じんを着火させ、通気門と坑道柵に延焼拡大し、最終的にベルトも燃焼し、我が国の坑内火災事故で最大の 83 名の死亡者を発生させた。

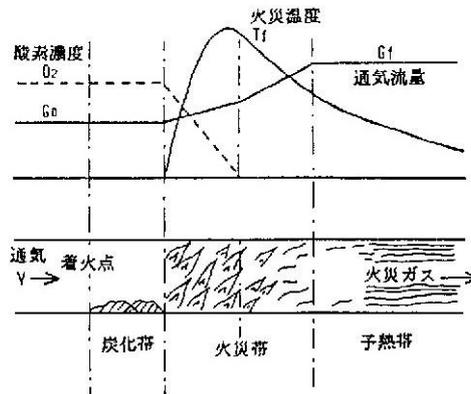
このベルトが関係する火災は、我が国だけではなく、同じような時期に諸外国でも同様にベルトコンベアの摩擦が堆積した炭じんを着火させ、坑道火災へと拡大している例がみられた。米国ウィルバーグ炭鉱の事例（1984 年 12 月）は、ベルトコンベア回転軸ベアリングの摩擦が堆積した炭じんを着火させ、坑道火災へ拡大し、27 名の死亡者を出した。ウクライナのドンバス炭鉱の事例（1991 年 6 月）は、ベルトコンベア駆動プーリーの摩擦により加熱落下したベルト片が堆積した炭じんを着火させ、坑道火災へ拡大し、32 名の死亡者を出した。

試験炭鉱における坑内火災に関する研究は、行政当局からの要請も含め、下記の目的で模型坑道や実規模坑道を使用して実験的な研究が行われた。

- ✓ 坑道火災の延焼特性
- ✓ 難燃性ベルトが敷設された坑道の燃焼特性
- ✓ 坑道火災の延焼防止
- ✓ ベルトが敷設された木枠坑道の防火対策・不燃化处理
- ✓ 坑道火災の消火対策 等

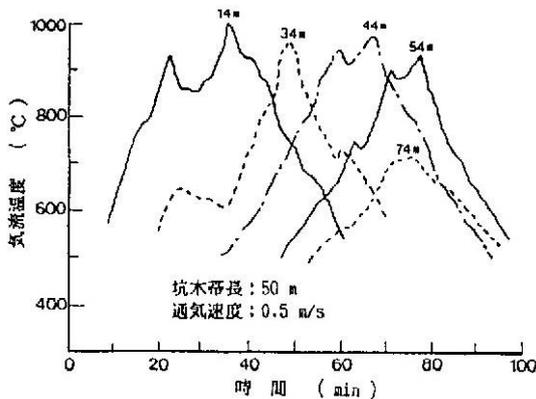
(1) 坑道火災の延焼特性

坑道火災の延焼については、A. F. Roberts<sup>5)</sup> により第 20 図のような概念モデルが提案され、模型実験などで研究が行われていたが、実規模坑道における研究データは発表されていなかった。

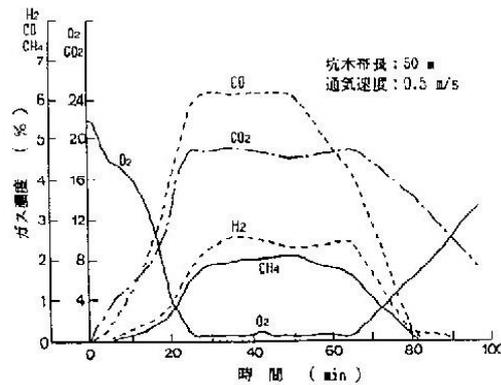


第 20 図 坑道火災の延焼に関する概念モデル<sup>5)</sup>

筆者等は、400 m 爆発試験坑道の内壁に断熱材を吹き付け、火災実験が出来るように加工し、実規模で各種の坑道火災実験を実施した。その初期的研究として、坑道内の可燃物密度（坑道単位空間あたりの可燃物重量  $[kg/m^3]$ ）と火災特性、坑道内の通気速度と延焼速度の関係などを調査した。



第 21 図 坑道火災時の温度変化

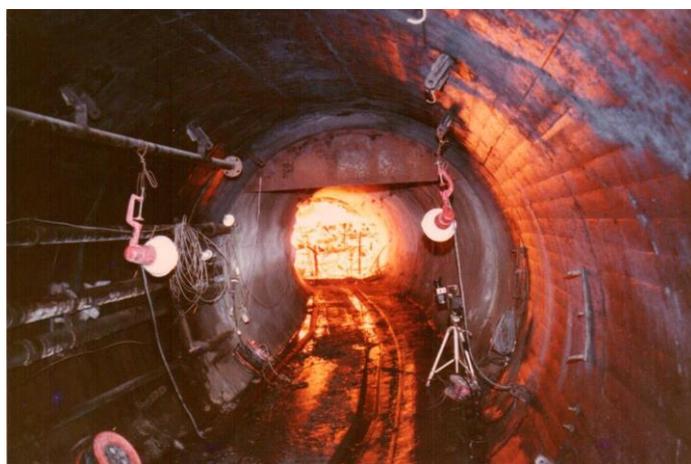


第 22 図 坑道火災時のガス組成

実験結果の一例として、坑道内に日本の炭鉱の平均的な坑木設置量である  $36 \text{ kg/m}^3$  の木材密度で長さ  $50 \text{ m}$  にわたって坑木を設置し、通気速度  $0.5 \text{ m/s}$  の条件で燃焼させたときの燃焼火災帯内の温度変化と火災帯風下で採取した火災ガスの組成変化をそれぞれ第 21 図と第 22 図に示す。この実験条件は、Roberts<sup>5)</sup>のモデルでは、Fuel-Rich（富燃料）タイプで、火災帯が形成された条件では最高温度は  $1,000^\circ\text{C}$  程度、火災帯形成時は風下の火災ガス中の酸素濃度はほとんど零で、一酸化炭素や水素などの還元ガスが高濃度で観測されている。実験時の火災帯風上の入気側から撮影した写真の例を第 23 図と第 24 図に示す<sup>6)</sup>。第 23 図は、通気速度が  $0.5 \text{ m/s}$  の場合で、天盤側に激しい燃焼ガスと煙の逆流が見られる。第 24 図は、通気速度が  $3 \text{ m/s}$  の場合で、煙やガスの逆流は全く見られない。



第 23 図 通気速度の遅い場合の坑道火災燃焼ガスと煙の逆流（通気速度  $0.5 \text{ m/s}$ ）



第 24 図 通気速度の速い場合の坑道火災（通気速度  $3 \text{ m/s}$ ）

これら、一連の実規模坑道における実験と模型実験の結果も含め、坑道火災の延焼速度は、通気速度に正比例すること、火災帯の長さはほぼ通気速度の平方根に比例して長くなるこ

と、また、各実験条件における火災帯風下の温度分布など、坑内火災対策に必要な基礎データが獲得された。

## (2) ベルトが敷設された坑道の燃焼特性

炭鉱内には、坑木だけではなく、ベルトコンベア、ケーブル、風菅などその他の可燃物が混在することが一般的である。当然、ベルトコンベア、ケーブル、風菅などの人工の可燃物は、難燃性の規格のものが使用されているが、実際の坑内火災では燃焼している。これら、人工の難燃性の可燃物が木枠などと混在したときの燃焼特性などについても調査した。それら実験の例を第 25 図に示す。



第 25 図 コンベアベルトと他の可燃物が共存したときの燃焼特性  
(左：ベルト＋ケーブル＋木枠、 右：ベルト＋ケーブル)

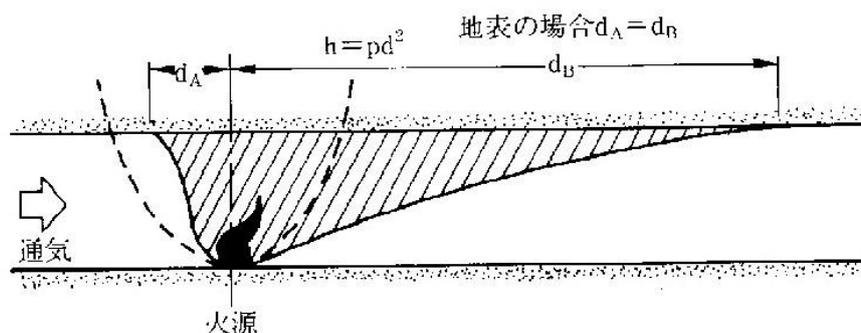
第 25 図左は、ベルト、ケーブル、木枠（ $10\text{ kg/m}^3$ ）が混在した場合、第 25 図右は、ベルトとケーブルのみが混在した場合で、通気速度はいずれも  $3\text{ m/s}$  の場合の事例で、いずれの場合も一定量の着火源があれば延焼している。難燃性は、着火しにくい性質であるが、燃焼しない、というものではない。これらの結果は、ウクライナや米国のベルトコンベア火災のほか、2013 年にベトナムで発生した火災でもコンベアベルトが全て燃焼している。

### (3) 坑道火災の延焼拡大防止

坑道火災が発生すると、直接消火を行うことは困難なことが多い、このため下記の方法により延焼拡大を防止する方法を実験と理論の双方を活用して具体的対策を明らかにした。

- ✓ 煉瓦、コンクリート覆工による不燃化<sup>7),8)</sup>
- ✓ 不燃材料による坑木、矢木（成木）の覆工による不燃化<sup>9)</sup>
- ✓ 水噴霧による難燃化<sup>10)</sup>
- ✓ 防火剤などの塗布による難燃化<sup>11)</sup>

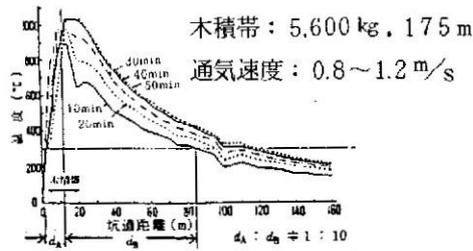
これらの考えは、一定の等温線以内の可燃物は延焼し、等温線以外にある可燃物は延焼しない<sup>12)</sup>、という地上の建物火災の考えを坑道内に応用しようとするものである。ただし、坑道火災の場合はこの等温線の分布に大きく偏りがある。その比較を示したのが第 26 図である。



第 26 図 坑道火災時の熱エネルギー（温度）分布の概念モデル<sup>13)</sup>

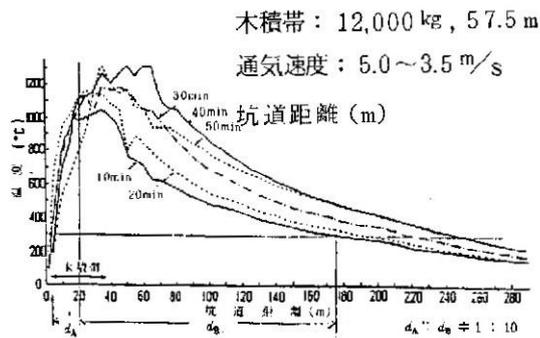
図中、破線で示された  $h = pd^2$  の曲線は、地上の建物火災の等温面モデル<sup>12)</sup>で火源を中心に対称な等温面が形成される。一方、坑道火災の場合、この等温面は通気により大きく歪み、実線で示したようなモデルとなる。このひずみの状態を調査するため、実規模火災実験における坑道延長方向の温度分布を調査した。その結果の例を第 27 図に示す。これらの実験により第 26 図の風上側の等温分布距離  $d_A$  と  $d_B$  の比を通気速度や可燃物量などを調査した。

各種実験を比較検討した結果、通気速度  $3.5\text{ m/s}$  以下の範囲では、 $d_A : d_B = 1 : 10$  の関係が可燃物量と関係なく、いずれの通気速度においても成立することが判明した。この結果は、炭鉱現場用の「不燃化・難燃化工法の指針」<sup>14)</sup>に採用された。



(b) 坑道距離と温度の関係  
(通気速度 1 m/s 燃焼実験)

燃焼実験



(c) 坑道距離と温度の関係  
(通気速度 3 m/s 燃焼実験)

### 第 27 図 坑道火災時の坑道延長方向の温度分布の例

第 27 図などの実験結果と、坑道内では、300°C以下であれば木材が延焼を受けないという実験的経験から、一般の坑道における風下方向で 300°C以下に温度が低下するための必要距離  $L$  (m)を実験的に求めた。

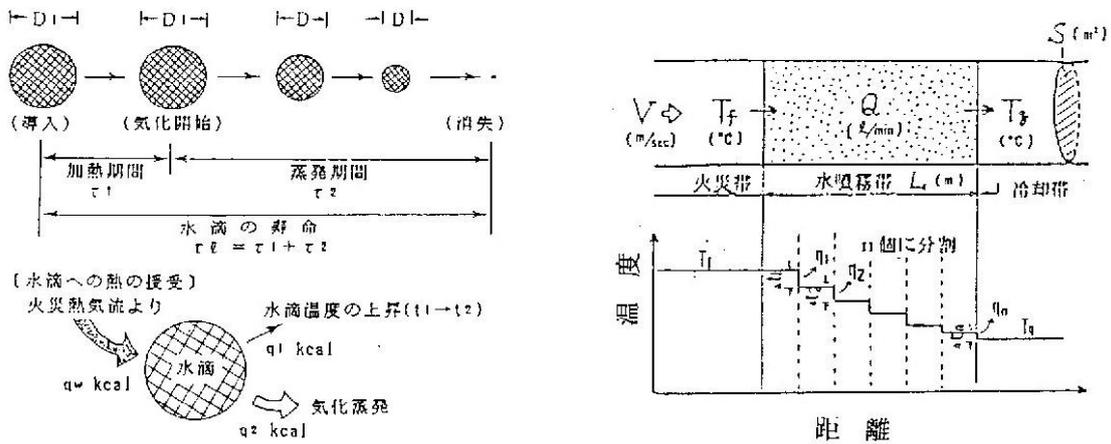
$$L = 51.6 \cdot V^{0.57} \cdot S^{0.5}$$

ここで  $V$  (m/s) は通気速度、 $S$  (m<sup>2</sup>) は坑道断面積である。上式に従って  $L$  (m) を求め、それ以上の区間を不燃化すれば、坑道の火災延焼はその不燃化帯により防止できることになる。

これらの物理的な不燃化帯に加え、水噴霧帯による延焼防止のための必要条件を第 28 図に示した計算モデルにより求め、その有効性を室規模実験により確認した。これらの研究の結果、坑道火災延焼防止のために必要な水噴霧帯の必要水量  $Q$  (l/min)は、次式で求められることが確認された。

$$Q = 38 \cdot V \cdot S$$

ここで  $V$  (m/s) は通気速度、 $S$  (m<sup>2</sup>) は坑道断面積である。



第 28 図 熱気流中の水滴の挙動 (左) と坑道熱気流冷却モデル (右)

#### (4) 坑内火災消火の実験的研究

坑内火災は、始発時の小規模な段階を除き直接消火することは極めて難しい。このため、遠隔消火技術として下記のような手法の有効性が実規模で検討された。

- ✓ 泡沫流送消火 (第 29 図参照)
- ✓ 不活性ガス流送による消火
- ✓ パラシュートを用いた通気遮断
- ✓ 不活性ガスと泡沫を複合させた消火 など

不活性ガスは、試験炭鉱で開発した方法として特殊ノズルで液体窒素を坑道気流中に吹き出す方法を開発し、特許も取得した<sup>15)</sup>。また、その液体窒素を気化したガスを使用して高膨張泡沫を発生させ流送すると極めて効果的な消火が出来ることも確認した<sup>16)</sup>。



第 29 図 高膨張泡沫流送による坑内火災消火実験

不活性ガスについては、「炭じん爆発防止研究」に引き続いて実施した中国との国際産業技術研究「坑内火災防止技術の開発に関する研究」（昭和 61～63 年度）で、中国の煤炭科学研究総院が開発した不活性ガス発生装置（第 30 図）を日本に搬送して試験炭鉱の試験坑道を使用してその有効性の試験も実施した<sup>17)</sup>。この不活性ガス発生装置は、ジェットエンジンの概念を応用して、燃料をエンジン内で燃焼させ酸素を消費し、二酸化炭素と窒素の不活性ガスに転化させる発送である。消火性能は液体窒素の急速気化による方法と類似しているが、操作性などに問題があることが判明した。



第 30 図 中国煤炭科学研究総院が開発した不活性ガス発生装置

## 5. その他の鉱山保安技術研究

筆者が長く関係した試験炭鉱においては、上記の炭じん爆発や坑内火災に加えて、炭鉱爆薬に関する研究が継続的に実施されてきた。試験炭鉱では鉱山保安法に基づく炭鉱爆薬や雷管の検討が行われてきたのに加え、多くの保安研究が実施されてきた。

鉱山保安法が施行されて以降、日本の炭鉱では 346 回のガス爆発が発生したが、その発生原因として、発破によるものが 80 回 (23.1%) 報告されている。これは電気関係によるものの 105 回 (30.3%) と裸火によるもの 100 回 (28.9%) に次ぐ主要な原因として無視できない数字で、ガス爆発や人災につながる「異常発破」の研究が多様な側面から研究された。

「異常発破」の原因としては、カットオフや死圧（一定以上の圧力を受けると爆薬は爆発しない）による残留爆薬、火薬の燃焼、過（弱）装薬、等々があり、これらのメカニズムや防止対策について坑内試験坑道や検定試験坑道用の臼砲などを使用して研究が行われた。

鉱山保安研究については、試験炭鉱以外でも九州センター（直方）、北海道センター、本書でも継続的に多様な研究が行われてきているが、その多くは筆者が直接的に関与したものではないので、ここでは記述しない。

ただ、我が国の炭鉱の閉山にともない、研究ニーズが次第に少なくなってきたこともあり、多くの鉱山保安研究が一般産業保安研究や公害・環境関係の研究に移行していき、鉱山保

安研究は平成5年度頃に事実上終了した。

## 6. 鉱山保安政策へ研究成果の活用

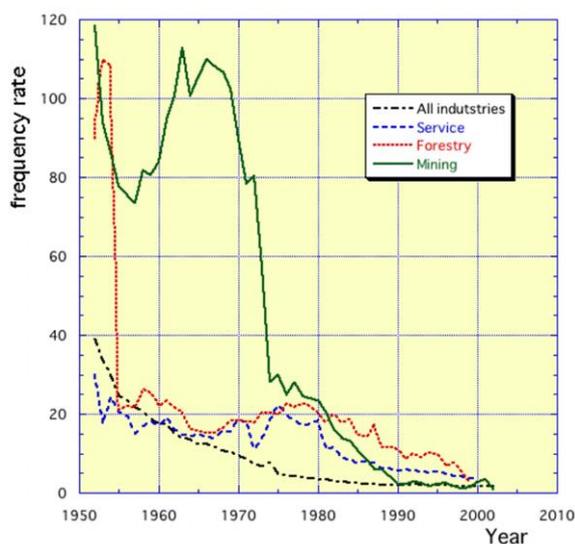
鉱山保安研究は、資源環境技術総合研究所とその前身の研究所で行われた多くの研究の中でも鉱山保安行政当局との結びつきが極めて強い分野の一つであると言えよう。炭鉱における重大災害の原因究明や鑑定を目的とした政府の事故調査委員会などにも各研究者が積極的に関わってきた。また、これらの中から新しい研究テーマが設定されたことも少なくない。

これらの研究成果は色々な形で鉱山保安政策に活用されているが、その代表的なものは、石炭鉱山保安規則や保安行政指針などへの反映が上げられる。石炭鉱山保安規則は、鉱山保安法の制定された昭和24年8月に同時に制定されて以降、平成6年3月に鉱山保安規則に改定されるまでに50回余り改正されている。この改正にあたり、鉱山保安研究の成果や重大災害の鑑定などが参考にされたことが少なくない。その代表例として、上記**3-(1) 炭じん爆発に関する研究**で紹介した石炭鉱山保安規則第百四十六条～第百四十八条に規定された「爆発伝ば防止施設」の水棚の規定は、試験炭鉱による成果がそのまま反映された。その有効性は、中国との国際産業技術研究でも確認された。

保安行政指針へ反映された例も多くあるが、その一例は、**4-(3) 坑道火災の延焼拡大防止**で紹介した「不燃化・難燃化工法の指針」<sup>14)</sup>でこの指針に基づき、全ての炭鉱で当該箇所の不燃化・難燃化が行われた。

これら公にされた資料の他、発生した重大災害の原因調査や再発防止の検討の過程で「技術検討資料」を行政当局や事故調査委員会へ提出したことも少なくない。

研究成果に加え、行政当局や石炭鉱山の努力の結果、1990年代以降は、石炭鉱山の保安成績は、地上の一般産業と比肩出来る程度までに改善された。(第31図)



第31図 我が国における各産業における死亡度数率の推移

## 7. 鉱山保安研究と国際協力

### (1) 研究所が行った石炭鉱山保安に関する国際協力

#### 1) JICA 集団研修「鉱山保安コース」

この集団研修「鉱山保安コース」は、昭和 57 年から平成 4 年まで、10 年間継続された。受け入れた研修員の総計は、101 名である。研修は約 3 ヶ月にわたって実施され、研究所における石炭鉱山保安関係の研究やそれらに関する保安技術を研修した他、関係する炭鉱や保安機器のメーカーなどを見学するコースであった。

最終回の平成 4 年 3 月には、研修に参加していたトルコの研修生の所属するゾングルダックの炭鉱で、ガス突出から自然発火によるガス・炭じん爆発、それに引き続く坑内火災が発生し、265 名の死亡者を出す大事故が発生した。トルコ政府からの要請に基づき、日本から調査団が派遣されることとなり、筆者は JICA 調査団の団長として、同時に派遣された日本石炭技術協会(JATEC)の調査団と共同してトルコの現場を訪問し、事故原因究明と共に再発防止策の提言を実施した。この調査提言がきっかけとなり、後述の JICA 技術協力プロジェクトが実施されることとなった。

#### 2) 国際産業技術研究 (ITIT)

発展途上国を対称とした国際産業技術研究事業 (ITIT)では、韓国と中国を対称とした炭鉱保安と工業保安を対称とした事業が実施された。韓国に対しては「深部炭鉱保安技術」(昭和 53 年度～昭和 55 年度)及び「粉体ハンドリング防災対策」(昭和 61 年度～昭和 63 年度)の二件である。筆者が関係したのは、中国煤炭科学研究総院との研究事業で以下の三件である

- ✓ 「炭鉱における炭じん爆発防止」(昭和 58 年度～昭和 62 年度)
- ✓ 「坑内火災防止技術の開発」(昭和 61 年度～昭和 63 年度)
- ✓ 「炭鉱におけるガス・炭じんの着火源」(平成 2 年度～平成 4 年度)

これらの研究成果の一部は、上記の **3. ガス・炭じん爆発対策**および **4. 坑内火災防止対策**の項で紹介した。また、この共同研究で操作性などの問題が明らかになった「不活性ガス発生装置」はその後改善され、筆者が関与したベトナムの炭鉱へ多数導入され、自然発火密閉内への不活性ガス注入に活用されているのは、感慨深いものがある。(第 32 図参照)

#### 3) 国際鉱山保安研究所会議

この国際会議は、戦前から開始され、鉱山保安技術に関する研究交流を二年に一回行う会議であったが、その大半の提出論文は大半が石炭鉱山保安技術に関するものであった。日本も昭和 40 年頃から正式メンバーとして参加するようになり、研究所から代表が連続して参加した。昭和 44 年 11 月にはこの会議が東京で開催され、会議の後、試験炭鉱見学会が催された。筆者もウクライナ、ポーランド、インドで開催された国際鉱山保安研究所会議に日本代表として参加し、研究発表を行うと共に各国代表と研究交流を行う機会を得

た。



第 32 図 ベトナム Hong Thai 炭鉱へ導入された  
中国煤炭科学研究総院製不活性ガス発生装置



第 33 図 インドにおける第 27 回国際鉱山保安研究所会議

#### 4) JICA 技術協力プロジェクト

研究所の事業ではないが、研究所 OB 等がチーフ・アドバイザーや専門家として参加した JICA 技術協力プロジェクトが、韓国（深部炭鉱通気対策）、トルコ（鉱山保安技術向上：1995 年 11 月～2000 年 10 月）、ベトナム（炭鉱ガス安全管理：2001 年 4 月～2006 年 3 月）に実施された。

筆者は、これらのうち、トルコの鉱山保安技術向上プロジェクトの立ち上げと、ベトナムの「炭鉱ガス安全管理センタープロジェクト」についてはプロジェクトの立ち上げと、

研究所を退職した後はチーフ・アドバイザーとしてプロジェクトの運営に直接関わった。この活動については下記、**(2) ベトナムにおける鉱山保安対策への貢献**で詳述する。

トルコのプロジェクトについては、1992年3月には、ゾングルダック地区のトルコ石炭公社（TTK）コズル炭鉱においてガス・炭塵爆発事故が発生し、死者265名を出す大惨事が起点となった。この事故の直後トルコ政府からの要請で、日本からJICAと当時のJATEC（現JCOAL）の双方から同時に調査団が派遣され、原因究明を行うと共に再発防止策の提言を行った。この事故は、海拔-500mの石炭切羽でガス突出が発生し、近傍で発生していた自然発火により突出したガスが着火してガス爆発となり、このガス爆発が炭じん爆発を誘発し、それらの爆発が最終的に坑内火災へ拡大し、制御不能となって海水による水没による沈静化が行われた。これら一連の調査により、ガス湧出の追跡、自然発火対策、通気管理技術、救護技術などの改善が必要であると判断し、トルコに不足している技術を日本から支援する提言を行い、それが結果的にJICA技術協力プロジェクトとして発足することとなった。

## 5) その他の協力

以上の国際協力に加えて、研修者の海外派遣や海外研究者・技術者達の招へいなどによる国際交流も積極的に実施された。

研究者の海外派遣の例としては、ブラジルサンパウロ州技術研究所の要請により「炭鉱爆発の安全性に関わる試験坑道安全度試験指導」（平成元年11月）を実施し、筆者も参加した。

海外研究者招へいにより中国から炭じん爆発、坑内火災防止などのテーマで、総計14名を招へいし、研究所の施設や試験炭鉱の設備を利用して保安技術の紹介や交流を実施した。

## (2) ベトナムにおける石炭鉱山保安対策への貢献

### 1) JICA 技術協力プロジェクト「ベトナム炭鉱ガス安全管理センター」<sup>18)</sup>

「ベトナム炭鉱ガス安全管理センタープロジェクト」は、1998年8月に炭鉱におけるガス爆発防止技術を対象としてベトナム政府から日本政府へ協力要請が寄せられた。1990年代以降のドイ・モイ政策に伴う経済成長に伴い、石炭の増産が求められてきた結果、炭鉱の宿命として露天掘りから坑内掘りへの依存が急速に高まりつつあった。坑内掘炭鉱では、使用機器類が老朽化していること、これまでは浅部での採掘が中心であった関係で、抜本的な坑内ガス管理の体制が確立されていないなどの問題点を抱えていた。これらに加えて、坑内のガス防爆管理の原点である炭鉱機器防爆検定システムも確立されていなかった。これらが当初要請の背景であった。この要請後、1999年1月にMao Khe炭鉱においてガス爆発が発生し、19名の死亡者を出すに至った。この事態は、技術協力の必要性を再認識させるとともに、重大災害時の救護活動技術についても技術協力要請が追加提出された。

この要請に基づき、下記の技術移転内容によるプロジェクトが設立され、2001年4月か

ら 2006 年 3 月まで技術移転が実施された。

- (1) 炭層ガス包蔵量評価技術
- (2) 通気網解析技術
- (3) 炭鉱ガス集中監視技術
- (4) 機器・爆薬検定試験技術
- (5) 救護活動技術
- (6) 鉱山保安教育技術
- (7) ガス安全管理法・組織体系

このプロジェクトの実施のため、研究所関係者からチーフ・アドバイザーとして参加した筆者ともう一名の研究所 OB に合わせ、述べ 8 名の研究者に短気専門家として協力を仰いだ。このほか、本省、大学、関係団体などから合わせて述べ 37 名の短期専門家による指導が行われた。

ベトナム側のカウンターパートは、プロジェクト発足当時、管理職などのパートタイムが 7 名、フルタイムが 15 名であったのが、プロジェクト最終年度にはパートタイムが 6 名、フルタイムが 38 名と大幅に増加した。これらのうち、22 名が本邦研修に派遣され、研究所、関係機関で指導を受けた。

また、技術移転に必要な機材として、ガス包蔵量分析システム、通気網解析システム、防爆検定システム、集中監視システム、爆薬検定試験坑道など約 3 億 7 千万円相当の機材が供与された。これに対しベトナム側からは 8 千万円相当のローカルコスト投入が行われた。

プロジェクトはベトナム側との信頼関係が確立され、大変円滑に進捗し、大きな効果を上げた。その代表的なものとしては、次のような成果が上げられる。

- ✓ IEC 規格に基づく坑内用電気機器や炭鉱爆薬などの防爆検定基準が確立され、検定実施規定なども制定され、プロジェクト終了までに公式な検定制度が運用されはじめ、プロジェクト期間内に 17 件の検定が実施された。鉱山保安センターは、ISO/IEC の認証試験機関としての資格を JICA プロジェクト終了前に獲得した。
- ✓ 協力炭鉱の Mao Khe 炭鉱に集中監視システムが設置され、運用が開始され、これが起点となって他の炭鉱へ集中監視システムが設置されるようになった。
- ✓ 通気網解析技術が確立し、ベトナムの全ての坑内掘り炭鉱へ通気設計の技術サービスが提供できるようになった。
- ✓ 保安教育システムが確立され、プロジェクト終了までに約 3 万 8 千人の炭鉱関係者に保安教育を実施した。
- ✓ プロジェクトセンターを基盤にベトナム側が 2002 年 10 月に「鉱山保安センター」を設立することを決定し、11,000 m<sup>2</sup> の敷地を新規に獲得し、庁舎、実験棟などの建設が開始された。



第 34 図 Mao Khe 炭鉱に設置された集中監視システム（右は坑内の CH<sub>4</sub> センサー）



第 35 図 坑内用電気機器の防爆検定試験



第 36 図 Khe Uom 試験場に設置された爆薬検定試験坑道



第 37 図 Mao Khe 炭鉱におけるガス爆発防止保安教育

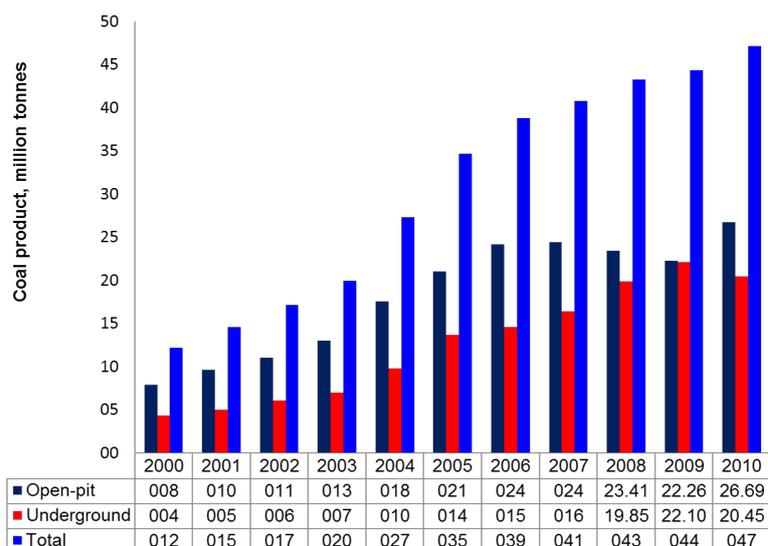
以上に示したようにプロジェクトは日越双方の関係者の努力により大変に大きな成果を上げることとなった。このプロジェクトが起点となってベトナム側により設立された鉦山保安センターは、現在ガス爆発対策だけではなく、ベトナムの炭鉦保安管理の中枢機関として機能しており、2016年7月時点で、職員数が77名となり、完全独立採算で運営されている。



第 38 図 現在のベトナム鉦山保安センター (Uong Bi City, Quang Ninh Province, Vietnam)  
(この庁舎の他、大型実験棟が3棟、寮 [12室]、テニスコートを装備、敷地：11,000m<sup>2</sup>)

## 2) ボランティアによる技術指導と研究展開

上記のプロジェクト終了後、経済成長の倍の速度（約15%/年）でエネルギー需要が増加している関係でベトナムの炭鉦では飛躍的に生産量が増大し、プロジェクト終了時点で30%程度であった坑内掘りの比率が、現在は50%以上に増大し、炭鉦の深部化・奥部化が急速に進行している。このため、JICAプロジェクトで指導の対称としたガス爆発以外の事故や保安上の問題が発生してきている。具体的には、無煙炭の自然発火、酸素欠損による死亡事故、ベルト運搬坑道の火災、異常発破による事故など、これまでにはベトナムで見られなかった事故が発生するようになってきている。これらの事故や問題が発生するたびにベトナムの関係機関から筆者に原因調査や対策についての指導要請が寄せられ、2006年3月のJICAプロジェクト終了後も要請があるたびにボランティアで訪越し、現在まで指導を継続している。



第 39 図 ベトナムの石炭生産量の推移

このような訪越指導の要請が継続したため、ベトナム側へ JICA のシニアボランティア制度を紹介して要請させ、2012 年 9 月から 2014 年 9 月まで筆者がシニアボランティアとして滞在して、2 年間継続的な指導を行った。その後も要請が続き、現在に至っている。

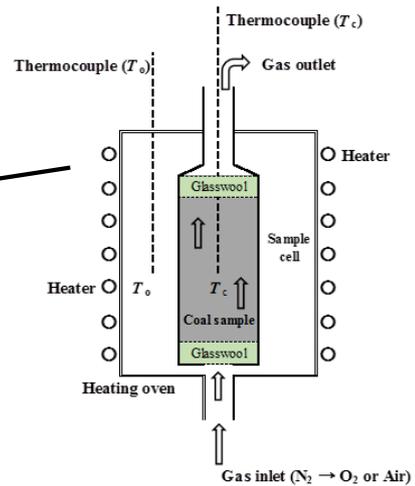
この間の主要な指導内容は、無煙炭の自然発火特性の調査研究、ベトナム炭鉱保安規則の改善の指導、坑内採掘による地盤沈下防止のための充填採掘技術の指導、紅河デルタ炭田開発可能性調査への助言などである。指導内容のうち、自然発火と炭鉱保安規則の改善については一貫して継続的に指導している。ベトナムの無煙炭炭鉱の自然発火について一部の成果を以下に紹介する。

ベトナムの無煙炭炭鉱の最初の自然発火は、2004 年 5 月に Hong Thai 炭鉱で発生した。これら引き続き、同炭鉱で 4 回、他の無煙炭炭鉱でも現在までに 7 回、合計 12 回の自然発火が発生している。これらの自然発火は Quang Ninh 省炭田の西部に集中していること、12 回のうち 8 回が 5 月と 6 月に発生するという、地域的と季節的な集中という特異性が見られる。これらの自然発火の消火対策として、包囲密閉による酸素遮断を指導して実践させている。もう一つの無煙炭の自然発火の特徴として、密閉内で観測されるガスに我が国の瀝青炭の自然発火に見られる C<sub>2</sub>以上の炭化水素ガスは、全く観測されず、高濃度の水素ガスと一酸化炭素が観測されるのみである。

第 3 表 密閉内ガス分析の一例

(Hong Thai 炭鉱、2004 年 6 月 1 日、単位%)

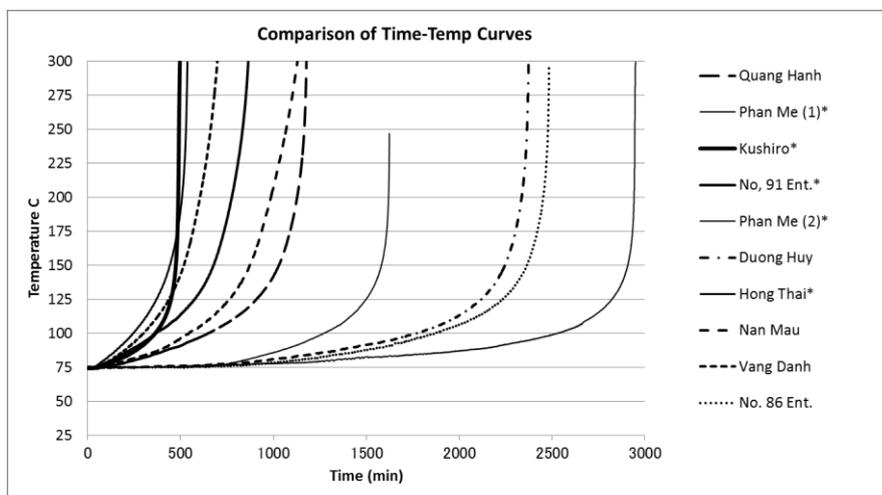
O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>
6.00	0.40	9.89	1.09	2.40



第 40 図 断熱式自然発火試験装置・ガスクロと断熱酸化試料セルの原理図

以上のような地域的な集中、季節的な集中、発生ガスの特異性などを解明するため、石炭試料の加熱酸化試験で発生するガスの分析や断熱環境で石炭試料の酸化速度を計測する装置で実験を進めさせている。

第 40 図は、石炭試料の酸化特性を調べる断熱式自然発火試験装置（島津 SIT-2）とガスクロである。図の右には断熱酸化試料セルの原理図を示している。小さな炉に入れられた石英ガラス製の石炭試料（約 1 g）セルの図である。実験開始前に試料セルに窒素ガスを流しながら、炉の設定温度 ( $T_o$ ) と石炭試料の温度 ( $T_c$ ) が同一となるまで待機した後、窒素ガスを酸素あるいは空気に変えて、石炭試料の酸化を促す。この時、石炭試料の酸化により上昇した石炭温度に追従して炉の温度を同じようにコントローラーで上昇させ、常時  $T_o = T_c$  の条件を維持する。これにより事実上石炭試料への熱の授受のない状態、つまり、断熱状態で石炭の酸化反応をさせ、その反応速度が計測できる原理である。

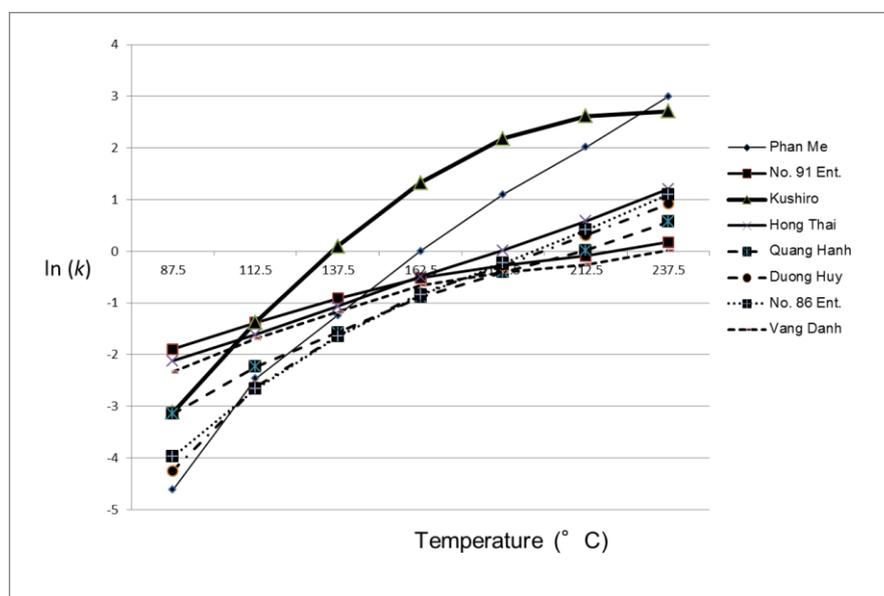


第 41 図 断熱式自然発火試験装置で観測した石炭試料の酸化による温度上昇曲線

第 41 図に断熱式自然発火試験装置（島津 SIT-2）で観測した石炭試料の酸化による温度上昇曲線の例を示す。試料名の右肩に\*印がついているのがこれまでに自然発火を経験している炭鉱の試料で、Phan Me 炭鉱は無煙炭ではなく、亜瀝青炭の炭鉱である。また、比較参考として日本の釧路炭鉱の石炭試料の結果も同時に示している。第 41 図の時間・温度曲線だけでは試料の酸化反応特性が把握できないため、反応速度定数を示すアレニウスの式の考えに基づく解析を行った。

$$k = A \exp(-E/RT)$$

ここで、 $k$ ：反応速度定数、 $A$ ：頻度因子（定数）、 $E$ ：活性化エネルギー、 $R$ ：ガス定数、 $T$ ：絶対温度である。解析では、この反応速度定数に相当する値として、酸化により石炭試料が 25°C 上昇するのに要した時間から割り出した見かけの速度  $k \approx 25/dT$  (°C/min) [ $dT$  は、25°C 上昇するのに要した時間] を求め、その自然対数 ( $\ln k$ ) を用いて整理すると、第 42 図のようになる。



第 42 図 石炭試料の見かけの反応速度定数と温度との関係

第 42 図の曲線は、アレニウスの式から各曲線の勾配が見かけの活性化エネルギー  $E$  に相当する。従来から活性化エネルギーの大きい石炭は自然発火しやすい、と一般に言われてきている。図から、瀝青炭の釧路炭や亜瀝青炭の Phan Me 炭はその定説に該当するが、無煙炭の試料はそれらと比較して勾配はるかに小さい。逆に自然発火の経験のある炭鉱の石炭試料の勾配が最小となっている。

図の比較から、自然発火を経験している炭鉱（Hong Thai と No. 91 Ent.）の石炭試料の反応速度が 150°C 以下の領域では、他の自然発火を経験していない炭鉱の石炭試料より大きな

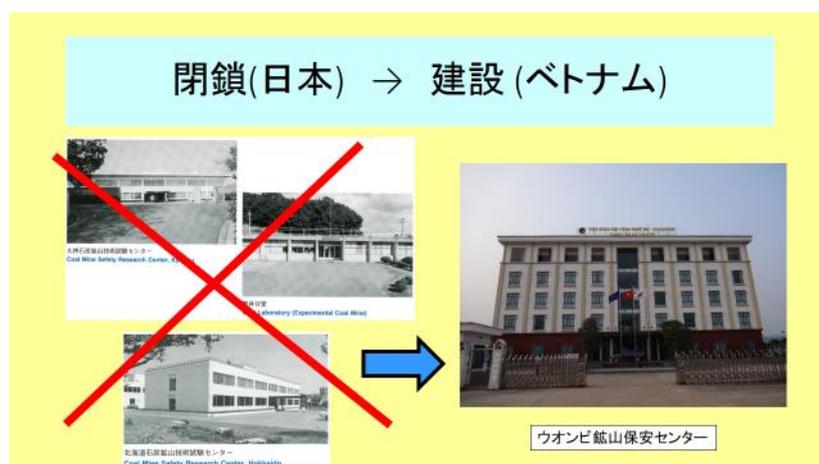
値を示しているのがひとつの大きな特徴であるといえる。

これら一連の実験の中で、石炭試料の持つ水分が初期の酸化反応開始を大きく支配しているという結果が明らかになり、現在その確認の実験を進めている。

## 8. おわりに

石炭鉱山保安技術の開発と海外との技術協力について筆者がおもに関係したガス・炭じん爆発と坑内火災に関する研究について紹介した。また、これらを基盤とする中国やベトナムとの海外技術協力についても筆者が関係している内容を中心に紹介した。これらの記述をする中で、改めて炭鉱の自然条件に支配される事象の難しさを再確認した。また、日・中で行った産業技術研究の成果（不活性ガス発生装置）がベトナムの炭鉱の自然発火消火対策に活用されているのを見ると改めて世界の石炭産業分野の関連の深さを感じる。

また、我が国の炭鉱の閉山にともない石炭鉱山保安技術の開発研究を担ってきた試験炭鉱、九州センター、北海道センターは閉鎖された。筆者はこれらの閉鎖に深く関わり苦労した経験から、改めて海外への技術支援、特にベトナムへの支援は公的な立場を離れた現在も私的な立場で強く推進している。これらの経験から、閉鎖する仕事より新たに建設・創設する仕事ははるかに楽しいものであることも痛感している。ベトナムの鉱山保安センターには研究所の九州センターや北海道センターが保持していた機能の 70%以上が備えられ、独立採算で非常に活力あふれる運営がされていることは大変に喜ばしい。



第 43 図 日本の石炭鉱山保安技術研究施設の閉鎖とベトナムにおける建設

研究所を退職して以降、ベトナムへの技術協力の専門家として、また、ボランティアとして 15 年間にわたって関わってきた結果、2015 年 3 月には、JICA シニアボランティアの天皇・皇后両陛下ご接見の一員に選ばれ、ボランティア活動の成果とともに私的ボランティアについてもご説明したところ、両陛下から多くの質問や賞賛のお言葉を賜った。大変光栄なことで、引き続き活動を続けていく活力をいただいた次第である。

## 参考文献・資料

- 1) (財) 石炭技術研究所・(社) 資源・素材学会、「炭鉱保安技術要覧 第1編 ガス・炭じん爆発」、1991年3月
- 2) 四元、他、「採炭切羽における湧出メタンの挙動と燃焼について」、採鉱と保安、Vol. 27, No. 1
- 3) 関、他、「小型試験坑道における炭じん爆発の伝ばについて(第1報)——爆轟の条件」、九州鉱山学会誌、Vol. 35, No. 8, 1967
- 4) National Research Institute for Pollution and Resources and Central Coal Mine Research Institute (China), “Research on suppressive method for coal dust explosion”, Report of International Research and Development Cooperation ITIT Project, July, 1986
- 5) A. F. Roberts, Combustion and Flame, Vol. 11, pp. 365-376, 1967
- 6) 駒井、井清、日本火災学会誌、Vol. 39, No. 2, pp. 1-6, (1989)
- 7) 井清、他、「坑道火災の防火帯の長さについて」、九炭技、Vol. 27, No. 2, 1974
- 8) 井清、他、「坑内火災拡大防止技術に関する研究——耐火帯の長さに関する実規模実験」採鉱と保安、Vol. 24, No. 7, 1978
- 9) 井清、他、「坑内火災拡大防止技術に関する研究——防火帯に関する実験」採鉱と保安、Vol. 25, No. 1, 1979
- 10) 井清、他、「散水幕の防火効果について」、採鉱と保安、Vol. 22, No. 2, 1976
- 11) 井清、他、「防火剤による坑内火災の抑制に関する研究」、採鉱と保安、Vol. 17, No. 2, 1971、及び、採鉱と保安、Vol. 17, No. 11, 1971
- 12) 共立出版、「火災」
- 13) 立地公害局鉱山保安技術検討委員会坑内火災防止対策部会、「不燃化・難燃化工法の指針作成に当たっての検討内容」、昭和60年11月
- 14) 立地公害局鉱山保安技術検討委員会坑内火災防止対策部会、「不燃化・難燃化工法の指針」、昭和60年11月
- 15) T. Komai & T. Isei: “Underground Fire Fighting System by a Rapid Evaporation Method of Liquid Nitrogen”, Mining Science and Technology, Vol. 8, pp. 145-152, 1989
- 16) 駒井、井清、他、「不活性ガスと泡沫の複合消火技術に関する研究」、資源、Vol. 1, No. 1, pp. 26-32, 1989
- 17) 中国煤炭科学研究総院、「DQ-150型惰気発生装置及其滅火実戦的技術報告」、1984年6月〔中国語〕
- 18) JICA 技術協力プロジェクト・ベトナム炭鉱ガス安全管理センター、「プロジェクト活動状況最終報告書」、平成18年3月

## 著者略歴

昭和 41 年 4 月 1 日	資源技術試験所入所
昭和 41 年 7 月 1 日	資源技術試験所九州支所 試験炭鉱
昭和 52 年 9 月 5 日	カナダ NRC 物理研究所 在外研究員 (1 年間)
昭和 56 年 5 月 23 日	京都大学工学博士
昭和 58 年 10 月 1 日	公害資源研究所 九州センター 第二課長
昭和 63 年 10 月 1 日	公害資源研究所 産業保安部 保安システム研究室長
平成 6 年 5 月 9 日	資源環境技術総合研究所 安全工学部長
平成 13 年 3 月 31 日	資源環境技術総合研究所退職
平成 13 年 4 月 1 日	JICA ベトナム炭鉱ガス安全管理センタープロジェクト チーフ・アドバイザー (平成 18 年 3 月 31 日まで)
平成 19 年 7 月 1 日	JICA ベトナム中小企業技術支援センタープロジェクト チーフ・アドバイザー (平成 20 年 8 月 15 日まで)
平成 24 年 9 月 24 日	JICA シニアボランティア「ベトナム炭鉱安全管理」(平成 26 年 9 月 23 日まで)
平成 27 年 3 月 3 日	天皇・皇后両陛下ご接見 (ベトナムにおけるボランティア活動をご説明)
平成 27 年 10 月 16 日	JICA 理事長表彰

受理日：2016年9月14日