

## 第188研究部会

### 石炭焚船の建造促進のための調査研究

#### 報告書

昭和57年3月

社団法人  
日本造船研究協会

世界的に石油代替エネルギーとしての石炭に寄せられる期待は大きいものとなっている。

船用燃料についても例外ではなく、内外船主の石炭だき船への関心が高まりつつある。

これらの動向をふまえて早期に近代的石炭だき船の建造体制を整備する必要があると考えられるので、本研究は技術的・経済的にもっとも効果的な、安全性、船内環境保全、公害防止への対応策を確立することを目的として、その第1年度である本年度はそれぞれのテーマについての基礎調査と石炭だきボイラの動特性の解析プログラムの作成を実施した。

## はしがき

本報告書は、日本船舶振興会昭和56年度補助事業「石炭輸送システム並びに石炭焚船建造促進に係る調査研究」の一部として日本造船研究協会第188研究部会において実施した「石炭焚船建造促進のための調査研究」の成果をとりまとめたものである。

本研究部会の委員は次の通りである。

### 第188研究部会委員名簿 (敬称略、五十音順)

部会長	宮嶋時三(東京商船大学)	
委員	浅井孝雄(日本郵船)	磯部俊郎(北海道大学)
	伊藤剛平(日本造船工業会)	印南正孝(日本钢管)
	植田靖夫(船舶技術研究所)	大野隆司(大阪商船三井船舶)
	柿原実(三井造船)	城子立夫(日本海事協会)
	田中勝夫(川崎重工業)	出口一彦(住友重機械工業)
	長島孝一(日本船用工業会)	福留理夫(石川島播磨重工業)
	松本利章(三井造船)	丸山忠(川崎重工業)
	三谷孝一(日立造船)	山田次敏(三菱重工業)
	袖木茂登(山下新日本汽船)	

### 第1小委員会委員名簿 (敬称略、五十音順)

委員長	山田次敏(三菱重工業)	
委員	青木元雄(日本郵船)	池上英文(川崎重工業)
	大場重美(公害資源研究所)	折戸博允(大阪商船三井船舶)
	鈴木邦治(三井造船)	城子立夫(日本海事協会)
	出口一彦(住友重機械工業)	手島登(船舶技術研究所)
	土居晃和(日本钢管)	平田栄(三井造船)
	福留理夫(石川島播磨重工業)	房村信雄(早稲田大学)
	松本利章(三井造船)	丸山忠(川崎重工業)
	三谷孝一(日立造船)	袖木茂登(山下新日本汽船)

### 第2小委員会委員名簿 (敬称略、五十音順)

委員長	福留理夫(石川島播磨重工業)	
委員	池上英文(川崎重工業)	宇田川達(日本郵船)
	大野隆司(大阪商船三井船舶)	菊地峻太郎(三井造船)
	城子立夫(日本海事協会)	高田純(住友重機械工業)
	館野寛三(石川島播磨重工業)	手島登(船舶技術研究所)
	土居晃和(日本钢管)	鍋田良祐(日立造船)
	菱川正文(住友重機械工業)	松田正康(住友重機械工業)
	松本利章(三井造船)	丸山忠(川崎重工業)
	三谷孝一(日立造船)	山田次敏(三菱重工業)

## 目 次

まえがき	1
第1編 船舶運航上の安全性確保の研究	7
第1章 石炭の自然発火防止のための基礎調査	7
まえがき	7
1. 石炭の自然発火現象	8
2. 炭質と自然発火	8
2.1 石炭化度と自然発火	8
2.2 石炭の鉱物質	10
2.3 石炭の水分含有量	11
2.4 石炭の破碎性	13
引 用 文 献	13
3. 環境条件と自然発火	15
3.1 溫度依存性	15
3.2 湿分（付着水分）の影響	16
3.3 酸素濃度の影響	16
3.4 堆積状態	17
引 用 文 献	17
4. 自然発火の検知方法（早期発見法）	19
4.1 溫度上昇検知による早期発見法	19
4.2 発生ガスの分析による早期発見法	21
4.3 臭気の変化による早期発見法	23
引 用 文 献	24
5. 自然発火の防止原理	27
5.1 防止原理	27
5.2 自然発火防止対策の実際	28
参 考 文 献	30
6. 自然発火の消火方法	32
6.1 不活性ガスによる方法	32
6.2 化学物質による方法	32
6.3 水、泥水等による方法	32
6.4 密閉（気圧均衡）による方法	33
6.5 その他の方法	33
引 用 文 献	33
ま と め	34
資料 1.1.1 日本炭、外国炭の元素分析、工業分析	35
資料 1.1.2 石炭運搬船の自然発火事故例	36
第2章 石炭のガス、炭じん爆発防止のための基礎調査	40
まえがき	40

1. 可燃性ガスの発生と爆発性	41
1.1 石炭からの可燃性ガスの発生	41
1.2 可燃性ガスの爆発限界	45
1.3 可燃性ガスの爆発現象	46
1.4 可燃性ガスの検知	46
引 用 文 献	48
2. 炭じんの発生と爆発性	49
2.1 炭じんの発生	49
2.2 炭じんの爆発限界	49
2.3 炭じん爆発のメカニズムと爆発現象	51
2.4 爆発圧力に及ぼす危険炭じんの性質と環境条件の影響	52
2.5 炭じんの測定	55
引 用 文 献	57
3. ガス・炭じんの着火源	60
3.1 着火温度	60
3.2 着火エネルギー	61
3.3 着火源の種類	62
3.4 静電気	68
引 用 文 献	78
4. ガス・炭じん爆発防止対策	79
4.1 ガス爆発防止対策	79
4.2 炭じん爆発防止対策	83
4.3 爆発伝播防止対策	85
4.4 爆発被害減少対策	87
引 用 文 献	87
ま　と　め	89
<b>第3章 ストーカー燃焼方式の機関プラントの安全性確保</b>	90
ま　え　が　き	90
1. ポイラプラントの構成	91
1.1 船級協会規則の調査	91
1.2 ポイラプラント構成に関するアンケート調査	93
1.3 石炭だきボイラの損傷調査	97
1.4 考　察	97
資料 1.3.1 石炭だきボイラの損傷例	100
2. 石炭だきボイラの動特性解析プログラムの作成	104
2.1 対象ボイラのモデル化	104
2.2 解析プログラム	106
2.3 デジタルシミュレーション用基礎方程式	115
2.4 計算結果の例	121
参　考　文　献	127

3. 余剰蒸気ダンプシステム	128
3.1 重油だき船と石炭だき船の燃焼制御装置の比較	128
3.2 各主要海事協会の動き	129
3.3 余剰蒸気ダンプシステムに関するアンケート調査結果	129
3.4 調査結果の考察	132
3.5 まとめ	137
参考文献	138
 第2編 船内環境保全のための調査研究	139
第1章 振動・騒音防止	139
まえがき	139
1. 調査対象機器	139
2. アンケート調査結果	139
3. 陸上石炭だきボイラ実地調査	141
3.1 D社(石炭だきボイラ)	141
3.2 H社(石炭だき温水ボイラ)	143
4. 船内搭載時の機関室、居住区に与える騒音影響予測	145
まとめ	149
引用文献	149
第2章 炭じん・石炭灰の拡散防止	150
まえがき	150
1. アンケート調査	150
2. 実地調査	157
2.1 K社	157
2.2 D社	157
2.3 H社	158
3. 調査結果の考察	159
3.1 石炭移送システム	159
3.2 灰処理システム	160
まとめ	160
第3章 石炭関連システムの保守・整備	161
まえがき	161
1. 石炭関連システムの保守・整備のアンケート調査	161
1.1 アンケート調査要領	161
1.2 石炭移送システムのアンケート調査結果	161
1.3 灰移送システムのアンケート調査結果	164
2. H社の実地調査	167
2.1 石炭移送システム	167
2.2 灰移送システム	168
3. 調査結果の考察	169
まとめ	170

第4章 石炭関連システムの監視・計測・操作	174
まえがき	174
1. 調査対象項目の選定	174
2. 対象項目の測定方式	174
2.1 レベル計	174
2.2 温度計	176
2.3 ガス検知計	177
2.4 重量計	178
3. 石炭だき船に装備した場合の要求項目	179
3.1 船舶特有の項目	179
3.2 船級協会から要求される装備場所特有の項目	179
3.3 石炭だき船特有の項目	180
4. アンケート調査結果	180
4.1 レベル計	180
4.2 温度計	182
4.3 ガス検知計	183
4.4 重量計	184
5. 調査結果の考察	185
5.1 レベル計	185
5.2 温度計	185
5.3 ガス検知計	185
5.4 重量計	186
まとめ	186
引用文献	186
参考文献	186
第3編 公害防止のための調査	189
第1章 港湾規則・基準	189
まえがき	189
1. 外地主要積卸港、石炭専用船の主要就航水域における規制	189
1.1 はじめに	189
1.2 外地主要港における規制の概要	189
1.3 主要港における規制例	189
2. 日本における法規制	190
2.1 規制の概要	190
2.2 関連法規及び規制内容	190
3. 国際法における規制	190
3.1 規制の概要	190
3.2 現行条約による規制及び今後発効が予想される条約の規制内容	190
まとめ	190
参考文献	191

資料 3.1.1 Hong Kongにおける“ The Dumping at Sea Act 1974”	202
資料 3.1.2 豪州N.S.W. 州の“ The Maritime Services Act 1935” にもとづく“Port Authority-Smoke Control-Regulations, N.S.W.”	204
資料 3.1.3 リンゲルマン濃度表について	207
第2章 石炭灰の発生量と発生割合	208
まえがき	208
1. 石炭灰の発生量	208
2. 石炭灰の発生割合	209
3. アンケート調査結果と考察	209
3.1 石炭灰の発生量	210
3.2 石炭灰の発生割合	210
まとめ	210
引用文献	211
参考文献	211
第3章 石炭灰の性状と環境への影響	212
まえがき	212
1. 石炭灰の性状	212
2. 環境への汚染に対する規制	213
3. アンケート調査	214
3.1 アンケート調査要領	214
3.2 アンケート調査結果	214
4. 調査結果の考察	215
まとめ	215
引用文献	215
附録 1. 石炭だき船指針各船級協会比較	220
附録 2. 石炭だきボイラ実地調査報告	224

## まえがき

世界的に石油代替エネルギーへの転換が進められつつあるが、その一環として石炭に寄せられる期待は大きいものとなっている。このような情勢の下で今後石炭の海上輸送量が急速に増加し石炭だき船の第一候補と見られる石炭運搬船の所要船腹量が増大することは確実であり、内外船主の石炭だき船への関心が高まりつつある。既に、オーストラリアの船主から75000トン型の石炭だきのボーキサイド運搬船が、日本の造船所に2隻、イタリアの造船所に2隻発注されており、このほか改造船を含め石炭だき船が3隻発注されている。

これらの動向をふまえてわが国に造船業界、関連工業界は着々と近代的石炭だき船建造体制を整備しつつあるが、近代的石炭だき船は最新の重油だき船との対比において前世代の石炭だき船には要求されなかった高度の自動化採用と保守整備作業の低減による乗組員定員の増加防止、船舶運航上の安全性確保、船内環境保全、公害防止など多くの前提条件を満足させる必要があるが、現状ではこれらすべてについての対策が確立されているとはいがたい。

そこで、近代的石炭だき船に要求される上記前提条件のうち主として安全性、船内環境保全、公害防止への対応策を確立して建造促進に役立たせるため本調査研究を実施するものである。

本調査研究は、日本造船研究協会が第188研究部会を設置し日本船舶振興会補助事業として3カ年計画で実施するものであり、全体計画の概要は次の表Iの通りである。

本報告書は、このうち第1年度である昭和56年度調査研究の成果をとりまとめたものである。

なお、自然発火およびガス・炭塵爆発に関する基礎調査は日本鉱業会に委託し実施したものである。

表I SR188「石炭だき船建造促進のための調査研究」年次計画表

調査研究項目	56年度(ストーカだき船)	57年度(ストーカだき船)	58年度(高性能石炭だき船)
a 船舶運航上の安全性確保の研究			
①石炭の自然発火防止	自然発火に関する資料調査	試料炭による特性把握試験と 船内設備のあり方	
②石炭のガス・炭塵爆発防止	ガス・炭塵爆発に関する資料調査	試料炭による特性把握試験と 船内設備のあり方	
③機関プラントの安全性確保			
(1)ボイラの数及び補助油だき容量	検討調査	あり方の指針の作成	
(2)ボイラ故障時の補助推進設備	検討調査	あり方の指針の作成	
(3)給炭及び灰処理システムの二重性の範囲	検討調査	あり方の指針の作成	

調査研究項目	56年度(ストーカだき船)	57年度(ストーカだき船)	58年度(高性能石炭だき船)
a 石炭だきボイラの動特性の解析 余剰蒸気ダンプシステム	解析プログラム作成 検討調査	解析計算 システムの指針の作成	
b 船内環境保全の研究 ②振動・騒音防止	居住区・機関室の振動騒音予測調査	防止対策の指針の作成	高性能燃焼方式に関する諸問題の検討調査
③炭塵・石炭灰の拡散防止	炭塵・石炭灰の拡散の予測調査	防止対策の指針の作成	
④石炭関連システムの保守整備	保守・整備の容易性の検討調査	システムの指針の作成	
⑤石炭関連システムの監視計測・操作	監視・計測・操作の容易性の検討調査	システムの指針の作成	
c 公害防止の研究 ⑥港湾規則・基準の調査	主要港の規則・基準の動向調査	—	
⑦石炭灰の発生量と分布	石炭灰発生量割合の調査	石炭灰発生量と分布の予測調査	
⑧石炭灰の性状と環境への影響	石炭灰性状の資料調査	物理的・化学的性状と環境への影響調査	
⑨環境への影響の総合評価	—	ストーカだき船の環境影響総合評価	

本調査研究は、次の前提条件のもとに実施した。

(1) ボイラ型式

56年度及び57年度の調査研究対象のボイラの型式として、石炭散布機（スプレッダー）と灰の連続排出のための移動火格子（トラベリンググレート）を組合せたスプレッダストーカ型ボイラを選定した。この型式はボイラ効率や広い炭種への適合性の点では、微粉炭だきボイラや流動床ボイラに劣るが、ボイラおよび関連システムが単純であり安全性、信頼性、保守性で優れているため、当面船用として最も確実な方式と考えられる世界的にも第一世代の船用石炭だきボイラとして考えられている。

(2) 炭種

調査研究対象の炭種は次の表IIに示す14種とする。但しこれらにつきデータが入手出来ない場合は他の炭種に代えてもよいこととする。これは、将来、石炭だき船の燃料として使用される可能性の強い主要輸入一般炭の内、なるべく日本が参加している鉱山（プロジェクト）から産出しているものを選んだ（表III）。

最終的には、一般的な設備指針を作成するという本調査研究の趣旨から、多数の炭種について調査する必要はないので、各主要産出国から2～3種を選定し世界的な普遍性をもたらせた。

なお、米国のBeatrice(Virginia州)は製鉄用であり、低揮発。強粘結原料炭であるからストーカだきには不適な面があるが、日本の製鉄会社が多量に輸入しているので、将来、船用の燃料として使われることも考えられるので、一般炭との対比のために本炭種を加えた。

表II 調査研究対象炭種

国名	銘柄	用途
日本	三池	一般用
	太平洋	"
オーストラリア	Warkworth	"
	Blair Athol	"
	Birds Rock	"
南アフリカ	Witbank	"
	Ernesto	"
カナダ	Mercoal	"
	Coal Valley	"
米国	Sufco(Alaska州)	"
	Sunnyside(Utah州)	"
	Beatrice(Virginia州)	製鉄用
中国	大同	一般用
	准北	"

表III 日本が参加している主要海外一般炭鉱、山の生産・輸出計画

国	銘柄	損益商社	生産地	開発始	開発規模	輸出予定期量	積出し港	最大船型
ニューランド イースタン・クリーク	MIMホールディング	伊藤忠商井三丸	QLD州 忠井産紅	1982年 出炭中	84年200万t 85年300万t 将来1,000	半量日本 100~150万t 500 1,000	アボット・ポイント グラッドストーン	将来 6000DWT 120,000
ブレア・ソール	ブレアソール・コール	岩物井三丸	QLD州 三井物産	85年500 (SRC用)	500	—	—	60,000
ミルメラン	アマックス・コーアス	QLD州	—	—	—	—	—	—
ワシントン	ウアムボウ・マイ	NSW州	出炭中	30.6	—	ニューカッスル	55,000	—
オーストラリア	モスクワブルック	NSW州	出炭中	85年 80年	200 120	シドニー	55,000	—
1	グロス・バレーワラメイン	丸日商岩井	NSW州 紅	化成丸 82年	100	100	—	55,000
スコットランド	ハンターバレー	丸日商岩井	出炭中	79年末 82年末	150 400	ニューカッスル	5,500	—
チエイシンバレー	チエイシンバレー	NSW州 紅	出炭中	250	250	—	—	—
1	ホワイト・インダストリー	三菱商事	出炭中	[80年 82年 84年 86年]	60 130 300 400	400	—	—
2	ユーラン	三菱商事	出炭中	[81年 84年 86年]	150 250 400	300	—	—
リ	ウォータース	三菱商事	出炭中	[81年 84年 86年]	150 250 400	300	シドニー	—
ア	クラレンス	BPコールオーリア、コーレックス	住友商事	1980年半	200	200	シドニー	—
ノーハミティジ	コーレックス、ホワイト・インダストリー	住友商事	1983年	150	150	シドニー	55,000	—
ウオルハング	ホワイト・インダストリー(25%)	三菱商事	QLD州 開発調査段階	—	—	—	—	—

国	銘柄	シッパー	扱い商社	産炭地	生産開始	開発規模	輸出予定量	積出港	最大船型
オーストラリア	バード・ロック	NSW州電力委員会	三井・伊藤忠	NSW州	1984年	200~400	200~400	シドニー	5,500t
	ドレイトン	太平洋炭鉱 シェル・オーストラリア、シングルデン	三井物産	"	1979年	100 200	100~200	ニューカッスル	5,500t
	マウント・アーサー	NSW州電力委員会	三井物産	"	1985年	100~500	100~500	—	—
	イーストリスゴー	電源開発 シェル・オースチン ブッシュ、三菱化成 丸	三井物産 紅丸	"		70~100	70~100	—	—
	ブラック・ヒル	バイマー	日綿実業	"		100	100	ニューカッスル	5,500t
カナダ	マークール	マナルタ・コール 電源開発	三井物産	アルベータ州	1981年末	200	200	ネブチューーン ロバートバンク	125,000t
	—	マナルタ・コール ラスカースデルコ	三井物産	"	1985年	200	200	—	—
	コールバレーレスブリッジ	ペトロ・カナダ ペントフィク・ペトロ ユニオン・オイル	三井物産	"	1978年7月	500	300	—	125,000t
	オベット・マーシュ	ユニオン・オイル レスコント・コール	三菱住商	"	1982年	100	100	—	—
	アサバスカ	"	三菱商事	"	1983年	300	300	—	—
	マクリード	マナルタ・コール 電源開発 ウエルドウドロー	未定	B C 州	1982年央	500	300	バンクーバー	125,000t
	クインサム	カイヤザー・リース ライン・クリーク	三井物産	"	出炭中	—	—	ロバートバンク	125,000t
	バルマー OX	カイヤザー・リース ライン・クリーク	三井物産	"	—	140	140	ポート・ムーテイ	65,000t
	コール・マウンテン	バイロン・クリーク	三井友商	"	出炭中	現在計画 50 150	150	—	—
アメリカ	カイハロウイツズ	エルバソ	三井物産	ユタ州	1981年	45~500	—	ロサンゼルス	70,000t

国	銘柄	シッパ一扱い商社	産炭地	生産開始	開発規模	輸出予定量	横出港	最大船型
アメリカ	ペルガコ	ブラー・アメックス、日商岩井コスタル・ペイト・エナジー	日商岩井	アラスカ州	"	84~85年 500		
	ペルガ丸	伊藤忠	伊丸	出炭中	150	50~150	ロサンゼルス	70,000
南アフリカ	クレインコビト	シェル・コール	—	トランスクーパー	1978年11月	320	リチャード・ペイ	150,000
	リーフブルート	#	—	#	1978年10月	350~600	#	#
	オブティマム	ゼネラル・マイニングカンパニー	伊藤忠、日商岩井	出炭中	611	500	#	#

1985年頃の輸出予定量 合計 約6,900万t／年

資料：テックス社の「原料炭年鑑」、石炭鉱業合理化事業団の「海外炭関係資料集」などより作成。

# 第1編 船舶運航上の安全確保の研究

## 第1章 石炭の自然発火防止のための基礎調査

### まえがき

炭鉱においては、古くから、採掘跡の残炭、沿層坑道の炭層亀裂部等の石炭の自然発火に起因する災害が多数発生している。例えば昭和46年～55年の10年間に報告された自然発火発生件数は29件に達する。炭鉱で自然発火が発生すると、坑内員のCO中毒、さらには激しい坑内火災へと発展し、人的、経済的に大きな損害を被る危険性がある。したがって炭鉱では、如何にして自然発火を防止するか、如何に早く自然発火の兆候を検知するか、また発生した自然発火をどのようにして消火するかについて、多くの現場的対策がとられてきた。また、大学や研究所においても、自然発火の発生メカニズム、早期発見法、予防対策、抑制法等について、わが国ばかりではなく世界的に多くの研究が行われてきた。

今回、石炭焚き船における石炭の自然発火防止についての調査研究が日本鉱業会に委託されたので、炭鉱の石炭自然発火の研究者を中心に委員会を作り、主として炭鉱関連の内外の文献を基にして、石炭焚き船の石炭自然発防止への適用を考えながら本報告書を執筆した。

勿論、炭鉱坑内と船上では環境条件が大いに異っているので、炭鉱での経験がそのまま石炭焚き船に適用できない部分も多いが、自然発火の発生原理や防止原理は共通していると考えられる。炭鉱は地下の炭層を採掘するところであり、複雑な自然を相手にしている関係上、時には人為的にはどうしようもない場合も出てくる。その点、人間の作った船の上では、パンカ等の構造もわかっているし、環境条件も把握し易いので、対策さえ十分に行えば、石炭の自然発火を防ぐことはそれ程難しいことではないと考えられる。

なお、日本鉱業会内に設けられた「石炭の自然発火、ガス・炭じん爆発に関する調査委員会」の中で、自然発火の調査を担当した委員は次のとおりである。

内野 健一	九州大学工学部資源開発工学科
小田 仁平次	石炭技術研究所
大塚 一雄	秋田大学鉱山学部採鉱学科
大場 重美	公害資源研究所
佐藤 干城	室蘭工業大学開発工学科
田代 裕	公害資源研究所九州石炭鉱山技術研究センター
樋口 澄志	北海道大学工学部資源開発工学科
山尾 信一郎	公害資源研究所資源第4部
山田 次敏	三菱重工業株船舶技術部

## 1. 石炭の自然発火現象

石炭の自然発火は、堆積している石炭層内に流入、浸透する空気中の酸素が、石炭表面に吸着されてしまう酸化現象が、次第にその速度を大きくし、発熱量を増し、温度を上昇させて遂に燃焼の状態にいたる現象である。

堆積層を構成する石炭の酸化特性は、自然発火の発生に最も大きくかかる性質であるが、いわゆる瀝青炭や褐炭のほとんどが自然発火する。石炭と酸素との間の反応はいわゆる気相と固相の間で起こる不均一反応で、反応過程は複雑で、単に石炭と酸素との間の化学反応としてだけでは扱いきれず、石炭の活性表面への酸素の到達、現象の進展に伴う熱移動、反応生成物の反応面からの離脱、移動などの物質移動なども反応過程に大きく影響し、その厳密な解析はほとんど不可能であり、現在は仮説をおいてモデル化し解析がなされている。

しかし、これまでの多くの研究から、石炭と酸素との間の反応は、一次反応で、その速度は空気中の酸素濃度に比例することが知られ、反応速度式をアレーニウスの式で近似して、活性化エネルギー、頻度係数あるいは酸素量の收支を考慮した反応速度常数などの算出が試みられている。

石炭層内に、酸素を充分に含んだ最適量の空気が供給されると、酸素濃度の高い新鮮な空気と接触するところほど大きな速度で酸化反応が営まれ、大きな反応熱が発生する。空気が、堆積層の内部に進むにつれてそのなかの酸素は消費され濃度が低下する。したがって、発生する熱量は流入する空気中の酸素濃度の最大な石炭層の表面近くで最大となる。しかし、外気に直接接しているその表面では、表面に接して流動する空気による冷却効果が大きく、逸散熱量が発生熱量を上まわり、むしろ、外気との接触面からある程度奥に入った冷却効果の少ない所での熱の蓄積が大きくなり、温度上昇が起り一層反応速度を大きくし、発生する酸化熱の量をさらに大きくして温度の一層の上昇を招く。

堆積層内で局部的な温度上昇が起これば、その周辺との温度勾配が大きくなつて比較的熱伝導性の悪いとされる石炭層内でも周囲への熱の伝達があり、付着水分の蒸発や浸透流通する空気による熱の搬出も活発になり、温度上昇は阻止される。しかし、このような形での熱の逸散は、むしろ、温度上昇域をその近傍に拡大させ、酸化反応に好都合な状況を作り、温度の上昇があつてその周囲での温度勾配を緩やかにして局部的に熱の蓄積を起こし、石炭の着火温度以上に温度を上昇させ、空気の供給が順調であれば、遂に燃焼の状態に達せしめる。

## 2. 炭質と自然発火性

石炭の自然発火は酸化熱の蓄積により発生するものであるから、自然発火に影響を及ぼす炭質条件としては、酸化熱の発生、蓄積に影響するものを検討すればよく、これから類似のものを除くと次の4因子  
(1)石炭化度 (2)石炭の鉱物質 (3)石炭の含有水分 (4)石炭の粉化性に整理することができる。以下これら4因子と石炭の自然発火性との関係について述べる。

### 2.1 石炭化度と自然発火性

一般に物質の酸化現象はその化学構造と関係がある。したがって、石炭の化学構造が石炭化度によって異なるものであれば、酸化現象も当然石炭化度によって変化するものと考えられる。

石炭の化学構造については、舟坂ら<sup>1)</sup>によってDryden, Van Krevelen らの提出した化学構造模型が紹介されており、日本炭については本田<sup>2)</sup>, 村田<sup>3)</sup> らの模型が提出されている。これらの文献によると、石炭の有機成分は $\text{—OH}$ ,  $\text{—COOH}$ ,  $\text{—OCH}_3$ ,  $\text{>C=O}$ などのような活性基を含むナフテン環、または芳香族縮合環を基本単位として、それらがメチレン結合やエーテル結合等により結びつけられたものとされている。また、この化学構造は石炭化度により変化するとして、本田<sup>4)</sup>は図1.1.1のような基本単位体の結合様式をもつ石炭モデルを考えている。この図において円は芳香族縮合核

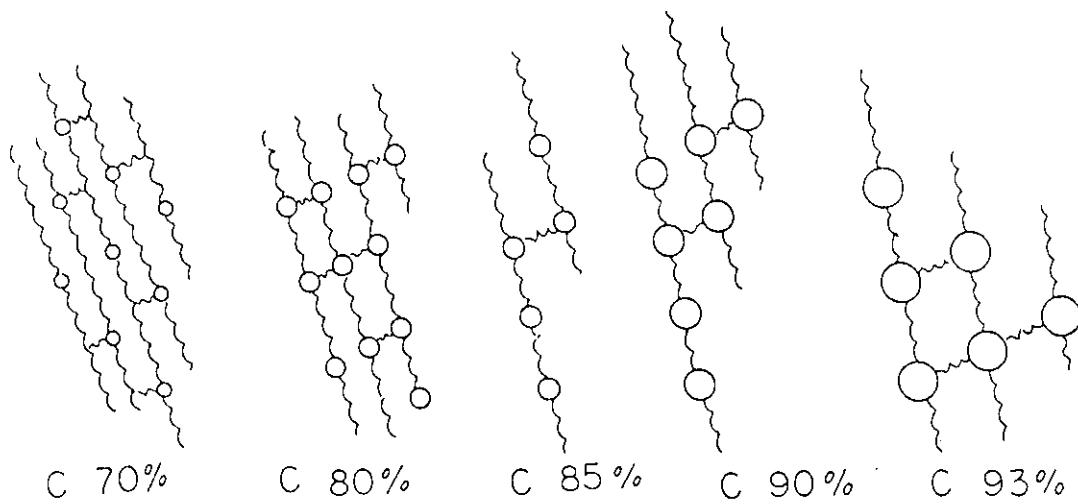


図 1.1.1 石炭の基本単位体の結合様式と石炭化度との関係

を示し、円の大きさは縮合核の大きさを表わしている。また、鎖の部分はメチレン結合やエーテル結合を表わし、石炭化が進むに従い、鎖状部分が減少し、芳香族核が発達していることを表わしている。

このような化学構造をもつ石炭に常温で酸素がどのように反応するかは不明であるが、芳香族核に結合している水素よりは、脂肪族や脂環族の水素と優先的に反応するであろうと推定される。

すなわち、Mazumdar<sup>5)</sup>は、酸化炭の環分析から、芳香族炭素原子数 Ca と全炭素原子数 C の比、 $Ca/C$  は酸化炭のほうが大きくなり、炭素原子 1 個当たりの環の数  $R/C$  も酸化炭のほうがいくらか増加していることを認め、酸化は主として脂肪族側鎖あるいは脂環構造部に集中されるとしている。

したがって、石炭の常温気相酸化は、主として図 1.1.1 の鎖状部に集中されると考えられ、鎖状部の多い低石炭化度炭ほど酸化されやすいということが推定される。

Carpenter<sup>6)</sup>は、炭素含有量 87.3% から 94.5% までの 6 種の石炭について、温度 75°, 85°, 95°, 105° および 115°C のときの 1 時間当りの酸素吸収量を測定し、酸素吸収量は炭素含有量に逆比例するとのべている。

Radmacher<sup>7)</sup>は、酸素あるいは揮発分含有量の多い石炭ほど酸素吸収量が増加する傾向があると述べている。

Orning<sup>8)</sup>は、断熱装置内におかれた石炭が酸化熱の蓄積により昇温する速度が毎分 15°C になるときの石炭温度  $T_{15}$  と石炭の揮発分含有量との関係を求め、揮発分含有量の多い石炭ほど  $T_{15}$  が低い、すなわち酸化しやすいとのべている。

Schroeder<sup>9)</sup>は、一定量堆積した石炭試料が、外部から熱の供給を受けることなく、酸化熱の蓄積によって発火に至るための最低温度を初期温度とよび、石炭の揮発分含有量が増加するほど初期温度は低くなり、揮発分 18~40% の範囲では、直線関係が成立するとのべている。

田代ら<sup>28)</sup>は炭素含有量 67% から 87% の日本炭を試料とした実験の結果について次のように述べている。

内容積約 500 ml の容器に 20~48 メッシュの石炭 25 g を入れて密封し、一定温度に保ち、1 時間後の石炭の酸素吸収量を石炭の炭素含有量に対してプロットすると図 1.1.2 のとおりである。図から、石炭化度の増加、すなわち炭素含有量の増加とともに酸素吸収量は指數曲線を描いて減少することが判る。

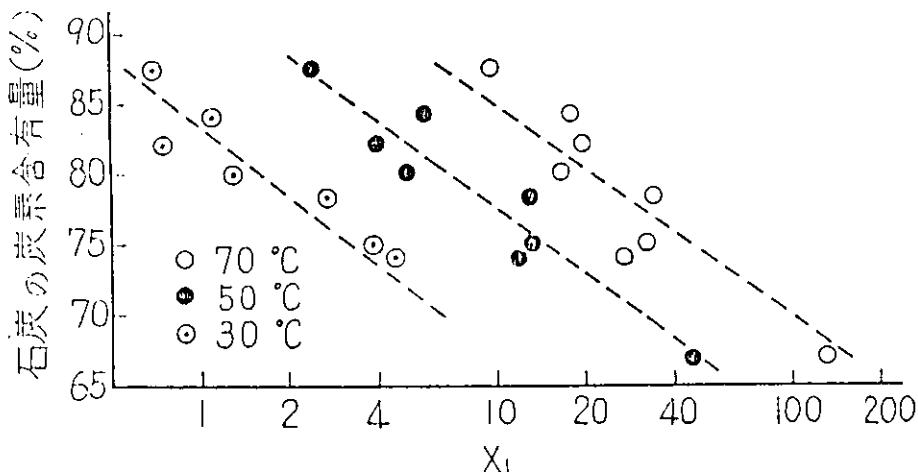


図 1.1.2 実験開始後 1 時間の酸素吸収量 ( $X_1$ )  
と石炭化度との関係

また、断熱状態におかれた乾燥石炭の 60°C より 140°C までの昇温曲線を、炭素含有量の異なる石炭試料について求めると図 1.1.3 のとおりであり、炭素含有量 74.9% の石炭は 60°C より 140°C まで約 2 時間で昇温するのに対し、炭素含有量 87.3% の石炭では 50 時間を要している。

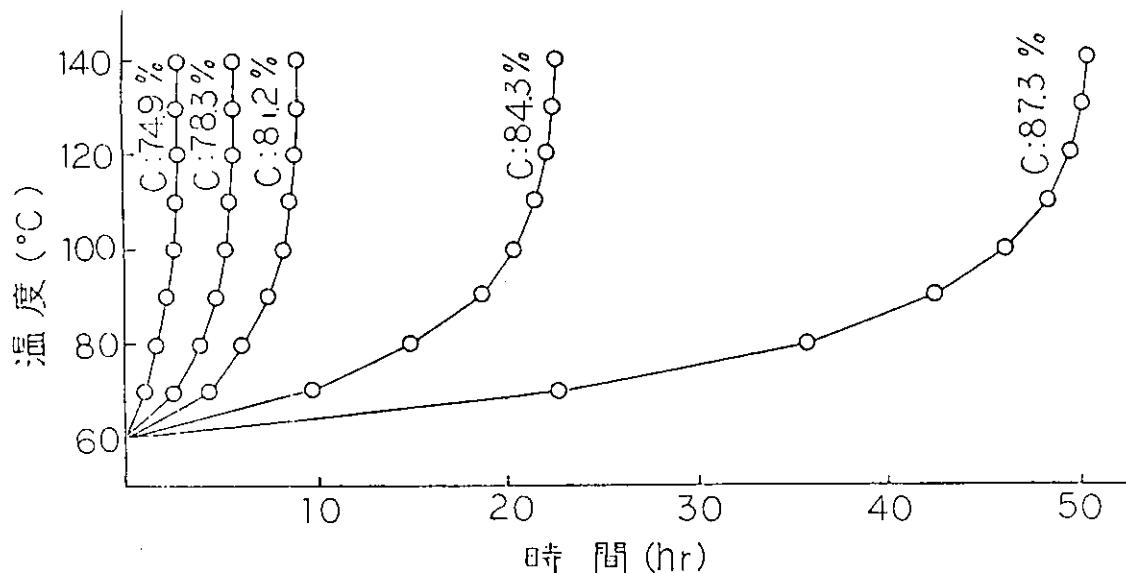


図 1.1.3 溫度時間曲線

これらの文献を総合すると、石炭化度が進んでいる石炭ほど酸化されにくいという結論になる。自然発火は石炭の酸化により起こるものであるから、石炭化度の観点のみからいえば、酸化され易い低石炭化度の石炭ほど自然発火し易いことになる。

## 2.2 石炭の鉱物質

石炭中の鉱物質は、シリカ ( $\text{SiO}_2$ )、アルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、酸化鉄 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )、石炭 ( $\text{CaO}$ )、マグネシア ( $\text{MgO}$ )、アルカリ金属酸化物 ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) などよりなり、シリカ、

アルミナ、酸化鉄が大部分を占める。<sup>10)</sup>これらの鉱物質は酸化熱を発生することはないので鉱物質の含有量が多いほど、酸化熱による昇温がおそくなり、自然発火を抑制することが推定される。前沢<sup>11)</sup>は、石炭に珪藻土を混ぜて灰分を増加させたとき、着火温度は高くなり、灰分と着火温度の関係は石炭により異なることを述べている。

これに対し、Mazumdar ら<sup>12)</sup>は、石炭の酸化速度がその石炭から抽出したビトレインだけの酸化速度より早いことを認め、この理由は石炭中の鉱物質の触媒効果であるとのべている。また、

Scott<sup>13)</sup>は、灰の中の石灰、鉄化合物などは石炭の酸化を促進し、アルミナやシリカなどは抑制するとのべている。燐を多く含む石炭は自然発火し易いという説もありいくつかの教科書に採用されているが、これは自然発火の多い2, 3の炭層に燐が多くかったという理由から作られた説で、この炭層に自然発火が多かったのは別な理由であり、燐の影響とは認め難いといわれている。<sup>26)</sup>黄鉄鉱、白鉄鉱の存在は自然発火の初期発熱を促進すると一般に考えられているが、自然発火の発生傾向が硫化鉄鉱の含有量と逆の関係にある場合もあり、定量的な関係は認められていない<sup>26)</sup>。

田代ら<sup>29)</sup>は、石炭を燃焼させて作った灰分を石炭試料に加え、灰分の含有量と酸化発生熱量との関係を求めた結果、酸化熱は灰分の增加に比例して減少したと述べている。

以上を総合すると、石炭の鉱物質の影響として触媒作用まで考える必要はなく、灰分含有量に比例して酸化発生熱が減少するとして、差支えないものと考えられる。

### 2.3 石炭の水分含有量

石炭の水分は付着水分（湿分）、固有水分及び結合水分に区別されるが<sup>1)</sup>、結合水分は常温における石炭の自然発火性とあまり関係ないものと考えられる。付着水分は機械的に石炭に付着している水分であり、後述の3.で述べる。固有水分は石炭の内部表面に吸着されているか、石炭内部の毛細管または微細な空隙に凝縮している水分である。石炭の水分と自然発火性の関係を扱った文献は多いが、付着水分と固有水分を明確に区別していないものもある。こゝでは固有水分を主とし、一部、付着水分のことも考慮しつゝ石炭の水分含有量と自然発火の関係について考察する。

Hedges ら<sup>14)</sup>は、円筒内の石炭に酸素を送入したときの石炭の昇温速度を測定し、乾燥した石炭は固有水分の残っている石炭より昇温速度が早いことから、石炭中の水分は自然発火性を減少させると述べている。Bhattacharayya ら<sup>15)</sup>は、石炭の水分含有量及び空気の湿度を種々変化させて石炭の酸化熱を測定しているが、その実験結果によると、実験開始後2時間までの発生熱量は、炭種にかかわらず、乾燥空気による乾燥石炭の酸化熱量が最大であることを示した。伊木ら<sup>16)</sup>は、乾燥窒素気流中で105℃、48時間乾燥させた石炭試料の酸化熱が乾燥処理していない石炭試料の酸化熱より大きいこと、石炭化度の低い石炭ほどその差が大きいことを指摘している。

このほか、水分が石炭の自然発火性を抑制するという研究報告をGuney<sup>17)</sup>の総説から紹介すると、次のようなものがある。E.Richter(1870年)およびS.Parr(1911年)は、黄鉄鉱がかなり含まれていないかぎり、水分は石炭の酸化を抑制するという。また、H.Fayol(1879年)は、石炭中の水分の自然発火助長作用は認められないといっている。E.Erdmann(1922年)は、石炭を乾燥させると酸化表面を増すため自然発火しやすくなるといい、A.Petrenko(1955年)は、水分は石炭の表面に薄膜を生成し、酸素が石炭の細孔に入るのを防ぐといっている。

これと反対に、水分が石炭の自然発火を促進するという研究報告には次のようなものがある。

Sondreal<sup>18)</sup>は、水分32.8%の亜炭の密閉容器内での酸素吸収量は、石炭試料が幾分乾燥して、水分20~32.8%になったときが最大であったと報告している。Nandy ら<sup>19)</sup>は、固有水分1~12%のインド炭の水分含有量を変化させ、水分が蒸発減少して4~6%になったときに着火温度が最低で

あったことを報告している。また、Nandy は、乾燥石炭に乾燥空気を送入したときに着火温度が最高であったことから、Jones ら<sup>20)</sup>がいう「炭素の酸化に触媒作用を与える水分」が存在しないためであり、水分をもつ石炭は、水分の触媒作用のため自然発火し易いと述べている。

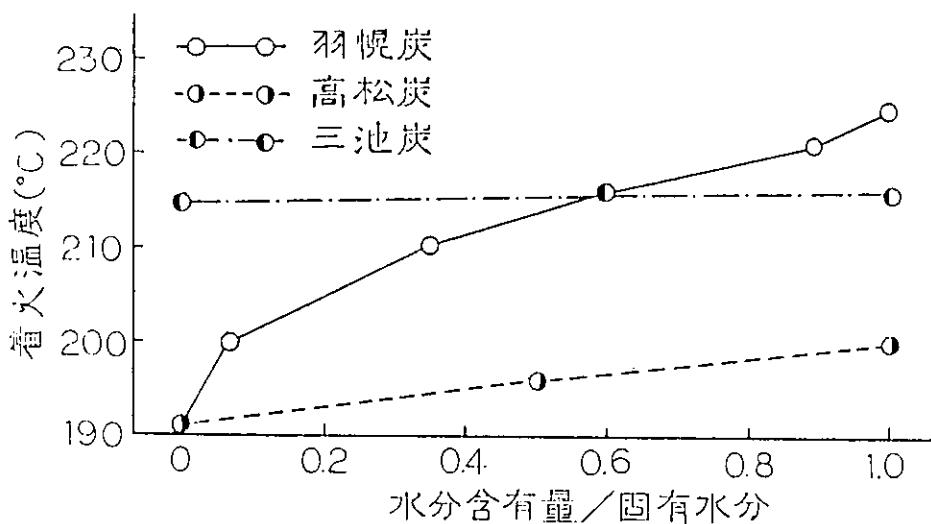


図 1.1.4 固有水分の蒸発減少に伴なう  
着火温度の変化

田代ら<sup>30), 31)</sup>は、同じ石炭試料について、固有水分が蒸発減少した場合の着火温度を測定し、図 1.4 のような結果を得、水分が減少するほど着火温度が低くなることを示した。また、窒素気流中で固有水分を蒸発減少させ、水分含有量を変化させた石炭試料に酸素を送入して自然発火を起こさせる実験を行い、図 1.1.5 のような結果を得ている。図中、曲線横の数字のうち、最初の数字は石炭の水

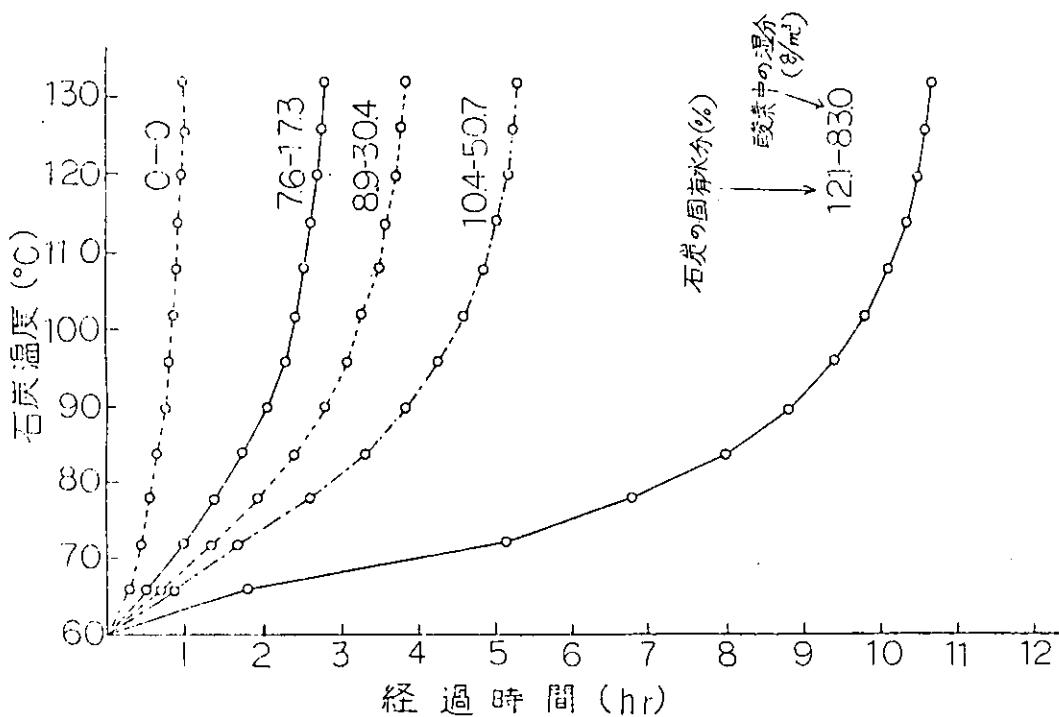


図 1.1.5 固有水分を変化した場合の温度時間曲線（藤田炭）

分含有量(%)で、後の数字は酸素の湿分(g/m<sup>3</sup>)である。この図から、乾燥石炭に乾燥酸素を送入したときの昇温速度が最も早く、石炭の水分含有量が多くなるほど遅くなる、すなわち自然発火し難いことが判る。

以上の文献を総合すると、石炭中の水分が石炭の自然発火を促進するという主張は、水分の触媒作用をその理由としたものである。これに対し、石炭の含有水分が自然発火を抑制するという主張は、水分が石炭の表面を被覆することと、水分が蒸発するときに熱を奪うという2つを理由としており、抑制作用を主張する説の方が実際的であると考えられる。

## 2.4 石炭の破碎性

石炭が破碎されると表面積が増加するため酸化発生熱量が増加し、粉化した石炭の間に空気層ができるため蓄熱性がよくなる。したがって破碎され易い石炭は自然発火し易いと考えることができる。

石炭の外部比表面積と自然発火性との関係については次のような報文がある。磯部ら<sup>21)</sup>は、北海道炭について石炭の外部比表面積と着火温度の関係を調べ、比表面積の増加につれて着火温度が低下するとのべている。また、古谷ら<sup>22)</sup>も北海道炭の着火温度を測定し、同様の結論を得ている。山崎<sup>23)</sup>は、7種類の石炭を28~35メッシュから200メッシュ以下の6種類に分けて試料について実験を行ない、酸素吸収量は比表面積の0.404乗に比例するとのべている。

Lowry<sup>24)</sup>は、2~10メッシュから200メッシュ以下の4種類の粒度の試料についての実験結果から、石炭の酸素吸収量は比表面積の0.327乗に比例するとのべている。

Scott<sup>25)</sup>は、150°Cから350°Cまでの温度範囲において石炭の酸素吸収量を測定し、20メッシュより大きい石炭では、酸素吸収量は石炭の比表面積に正比例して増加するが、比表面積の増加につれて酸素吸収量の増加割合は減少すると述べている。

田代ら<sup>32)</sup>は、城ら<sup>27)</sup>の破碎性測定値が炭素含有量と一定の関係をもつこと、また石炭の外部比表面積と酸化熱蓄積量の間に対数的直線関係のあることを見出している。

以上のこととを総合して、破碎性の点から云うと、破碎され易い石炭ほど自然発火し易いといえる。坑内石炭では、含有水分の蒸発減少や付着水分の増加は少ないため、自然発火が発生する場合、石炭化度の違いによる酸素との反応性の差は、含有水分(石炭化度の低い石炭は一般に水分含有量が大きい)のもつ酸化抑制作用の差と相殺され、炭質が自然発火性に及ぼす影響としては破碎性が最も強い因子と考えられる。これに対し坑外貯炭または船上貯炭では、水分の蒸発減少が起こり、石炭化度の差による酸素との反応性が強い因子となると考えられる。例えば、オーストラリア等から輸入されようとしている低炭化度の褐炭が乾燥した場合、貯炭中に石炭が自然発火する可能性は十分に考えられる。

## 引用文献

- 1) 舟坂渡、横川親雄：石炭化学、p.225 共立出版(1964)
- 2) 本田英昌：石炭化学工業、p.74、産業図書(1960)
- 3) 村田富二郎：石炭化学、p.63 勉草書房(1964)
- 4) 本田英昌：前掲 p.38
- 5) B.K.Mazumdarほか：Mechanismus der Oxidation der Kohle. Brennstoff Chemie, Vol. 38, p. 305(1957)

- 6) D.L.Carpenterほか : The initial stages of the oxidation of coal with molecular oxygen. Fuel, Vol.43, №4, p.247(1964)
- 7) W.Radmacherほか : Die Oxidation von Stein Kohlen bei der Lagerung und Massnahmen zu ihrer Bekämpfung. Brennstoff Chemie, Vol.42, №4, p.97(1961)
- 8) A.A.Orningほか : Reactivity of solid fuels Ind. Eng. Chemistry, Vol.40, №3(1948)
- 9) H.Schroeder : Untersuchungen ueber des Verhalten von Kohlen beim Erhitzen im Sauerstoffstrom, Brennstoff Chemie, Vol.35, №1~2, p.14(1954)
- 10) 本田英昌 : 前掲 p.27
- 11) 前沢昌武 : 石炭の酸化性と着火温度, 燃料協会誌, 30巻, p.190(1951)
- 12) B.K.Mazumdarほか : Further studies on the mechanism of the oxidation of coal, Fuel, Vol. 38, p.469(1959)
- 13) G.S.Scott : Anthracite mine fire, U.S.Bur.Mines Bull.455, P.10(1944)
- 14) D.J.Hedgesほか : The influence of moisture on the spontaneous heating of coal, The Mining Engineer, Jan., p.211(1964)
- 15) K.K.Bhattacharayyaほか : The influence of humidity on the initial stages of the spontaneous heating of coal, The Mining Engineer, Feb., p.274(1964)
- 16) 伊木正二ほか : 常温付近における粉炭の酸化熱測定, 日本鉱業会昭和45年度秋季大会分科研究会資料
- 17) M.Guney : Oxidation and spontaneous combustion of coal:Review of individual factors, Coll.Guard, Vol 216, p.105, p.137(1968)
- 18) E.A.Sondreal : Studies on low temperature oxidation of lignites as related to storage, U.S.Bur.Mines, Inf,Circ,8234(1964)
- 19) D.K.Nandyほか : Effect of moisture on the selfheating characteristics of coal, Journals of Mines, Metals and Fuels, Oct.1967
- 20) R.E.Jonesほか : The role of oxygen complex in the oxidation of carbonaceous materials, Transactions of Faraday Society, Vol.42 p.297(1946)
- 21) 磯部俊郎ほか : 北海道炭の自然発火性に関する研究(第1報), 北鉱誌, 14巻, 3号(1958)
- 22) 古谷敏夫ほか : 石炭の自然発火性に関する研究(第1報), 北鉱誌, 17巻, 5号(1961)
- 23) 山崎豊彦 : 石炭の酸化性(第1報), 日鉱誌, 69巻, 781号(1953)
- 24) H.H.Lowry : Chemistry of coal utilization Vol.1, p.645, John Wiley and Sons. New York(1945)
- 25) G.S.Scott : Anthracite mine fire:their behaviour and control, U.S.Bur.Mines Bull.455(1944)
- 26) 境田三郎 : 石炭の自然発火, 技術書院
- 27) 城博ほか : コークス用炭の粉碎性について 九鉱誌 29巻9号(1961)
- 28) 田代襄ほか : 石炭の自然発火初期現象と石炭化度との関係, 日鉱誌 85巻972号 p.245
- 29) 田代襄ほか : 石炭の自然発火に関する研究(第2報), 採鉱と保安 20巻 3号 p.119
- 30) 田代襄ほか : 石炭の着火温度, 自然発火所要時間と水分の関係, 日鉱誌 87巻 996号 p.161
- 31) 田代襄ほか : 石炭の酸化熱と水分の関係 日鉱誌 89巻 1029号 p.717
- 32) 田代襄ほか : 石炭の破碎性と自然発火性との関係 日鉱誌 90巻 1033号 p.186

### 3. 環境条件と自然発火

#### 3.1 溫度依存性

一般に気固相反応においては、反応速度は温度の上昇とともに大きくなるが、その依存性は Arrhenius 式によって代表されている。

石炭の酸化反応においても、その速度は Arrhenius 式にあてはまることを多くの研究者が示している。しかし、Lowry<sup>1)</sup>や田代<sup>2)</sup>は酸素消費量の対数と反応温度の逆数との間に直線関係は成立するが、前者では 80~90°C 後者は 100°C 付近において直線が屈曲する結果を得ている。一方、橋本<sup>3)</sup>は大夕張炭を用いた初期酸化率から Arrhenius 式よりも  $C1^{-\frac{1}{a}}$  で示す実験式がよりあてはまり、この結果は Porter-Ralson や Scott の結論と一致するとのべている。

発熱速度の温度依存性は Arrhenius 式に従わなかったことを山崎ら<sup>4)</sup>は報じているが、これは当然である。酸化によって生じた物理的、化学的变化量は同じであっても、石炭は温度によって酸化生成物が異なり、それによって発熱量もまた異なる。従って反応速度 × 発熱量の形で求められる発熱速度は Arrhenius 型とはならない。佐藤ら<sup>5)</sup>は示差走査型熱量計による発熱速度測定を行い、発熱速度の温度依存性は 3 次の代数的整関数で近似出来るとのべて実験式を提示している。山崎は、また温度が 60°C を越えると発熱速度が急激に増加したとのべており、佐藤は発熱速度の急激な増加は自然発火性類型 \* I 型で 60°C、II 型で 90°C、III 型では 120°C と石炭の種類によって異なる結果を得ている。星沢ら<sup>6)</sup>も貯炭の自然発火について 60°C を危険温度としている。更に星沢は野積貯炭について、太陽放射の影響は表面から 10~15 cm 程度、季節変化による温度変動は表面から約 1 m、昼夜変動は 0.5 m 程度とのべている。佐藤らもウエストベランビ炭（豪）について外気温度の影響は 1 m 以内との結果を得ている。

以上のことから積上げ時の初温が自然発火の進行に大きな影響を与えることは容易に推測出来るが、星沢の試算の 1 例では初温度が 20°C のときには約 1 カ年、30°C のときには約 6 カ月で危険温度に達するとしている。

##### \* 自然発火性類型の特徴

I 型 …… 常磐、太平洋、本岐等

$$a \times 10^7 \div 10$$

警戒温度 50~60°C

発熱速度増加割合が大きい。

表面劣化が早い。

COガスが比較的低温から離脱。

II 型 …… 大夕張、高島 18 尺、赤平、南大夕張等

$$a \times 10^7 \div 1 \sim 2$$

警戒温度 90°C 前後

発熱速度停滞区間あり。

表面劣化が遅い。

COガスによる早期発見がむづかしい。

III 型 …… 池島、高島盤底等

$$a \times 10^7 < 1$$

警戒温度 120~130°C

発熱速度が小さい。

### 3.2 湿分(付着水分)の影響

湿分が自然発火に対して何らかの影響をもつことは一般に認められているが、促進作用を行なうとするものと、抑制の方向に働くとするものと意見が2つに分れている。(以下水分と記してあるのは湿分と同義語)

Rosin<sup>7)</sup> や Rees<sup>8)</sup> は水分は石炭の自然発火過程に極めて重要であり、触媒的作用を果すものと仮定しており、Li-parr<sup>9)</sup> 及び Davis-Byrne<sup>10)</sup> は実験的研究から水分は触媒的働きをして酸化を促進させるとのべている。Graham<sup>11)</sup> は30°C及び50°Cで石炭に乾燥空気と湿り空気を通し、後者の方が酸化速度が早いという結果を得ている。また Porter-Rolston<sup>12)</sup> は乾燥石炭をねらすと発熱するとのべている。Berkowitz-Shein<sup>13)</sup> は亜炭と湿り酸素を反応させて25°Cから50°Cまでの温度上昇を測定し、酸素を窒素に変えてほんとと同じであったところから、水分の吸着熱が自然発火の原因であると考えた。また乾燥酸素の場合の温度上昇は僅かであり、瀝青炭ではあまり温度はあがらなかったと報告している。Hodges-Hinsley<sup>14)</sup> は石炭に酸素と水分の吸着が同時に起るときは、石炭の温度は上昇して自然発火を起すであろうと論証している。Hodges-Acherjee<sup>15)</sup> は30°Cにおける酸化発热量は同温度における水分の吸着熱に比べ非常に小さいことを実験によって求めている。

一方、Richter<sup>16)</sup> は水分が促進的役割を果すことを否定しており、Fayol も同じ意見で、水分の影響はないと主張している。Moor-Sinnatt<sup>17)</sup> は石炭中へ水が浸透することを実験的にたしかめ、水分は抑制的に働くと考え、Petrenko<sup>18)</sup> も水分が石炭表面で薄膜を作つて酸化を抑制するとのべている。田代ら<sup>19)</sup> も石炭の内部表面あるいは外部表面に付着した水分が、石炭と空気との接触を妨害すると報告している。伊木一樋口<sup>20)</sup> は乾燥窒素気流中で105°C、48時間乾燥させた石炭の酸化発生熱は、乾燥処理しないものよりも大きいと報じている。

以上のごとく、これまでの研究を総括すると、乾燥石炭に空気中その他から湿分が加えられると、最初は吸着熱によって発熱が起りうるが、吸着段階を過ぎてからの加湿は逆に自然発火を抑制するものと考えるのが妥当であろう。

### 3.3 酸素濃度の影響

酸素濃度が酸化反応に影響を与えることは明瞭で、自然発火についても同様の傾向を示すものと考えよいようである。

Parr-Wilner<sup>22)</sup> は石炭の酸化速度は酸化媒体中の酸素濃度とともに変化することを観察した。これと同様な酸素吸收速度測定から、一定温度において気相中の酸素濃度が酸化速度に及ぼす影響について行った研究が2、3みられる。Schmidt-Elder<sup>23)</sup> の研究では、空気中の酸素濃度がその正常値(20.93%)より少ない場合は、100°C程度の温度では、酸化速度は空気中の酸素百分率の0.61乗に比例して減少する結果を得ている。また、Winmill<sup>24)</sup> は30°Cにおいて0.5乗を。Porter-Ralston<sup>25)</sup> は200°Cにおいて0.71乗に、星沢ら<sup>6)</sup> は130°C前後の温度において $\frac{2}{3}$ 乗に比例する結果を得ている。Scott<sup>25)</sup> は酸素吸収量から熱生成速度を算出する式を提示しているが、その中の酸素濃度ファクタPを次式で示している。

$$P = 20.93 - [\text{O}_2] / \ln \frac{20.93}{[\text{O}_2]}$$

橋本<sup>3)</sup> はこれらの結果について、自然発火発生理論の中で検討を加え妥当性を評価している。

渡辺ら<sup>26)</sup> は Scott の酸素濃度ファクタ P と着火温度の関係を求め、着火温度は [O<sub>2</sub>] 濃度の 0.112 乗に比例して上昇すると報じている。

Klaldane, Meachem らは室温において密閉容器中の石炭の酸化速度は酸素分圧に正比例するところを述べている。また磯部-佐藤<sup>27)</sup>は25℃の実測等温線が酸素分圧の $1/n$ 乗で表わされるFreundlich型を示したと述べている。田代ら<sup>28)</sup>は空気中の酸素濃度が自然発火初期現象にどのような影響を与えるかを自作の差熱炉による温度差、酸素消費量、断熱炉による昇温特性の3方向から検討し、それについて実験式を提出している。

鈴木<sup>31)</sup>は熱重量分析を行い、不活性ガス中の酸素濃度が10%程度において急激な酸化抑制効果が生じたとし、中規模な自然発火実験炉においてそれを検証している。

星沢らは粉炭層の通気漏度に関する結果を得ている。

自然発火は石炭と酸素の接触をたつことによって防止できる。この場合の酸素濃度は10%以下にすることが必要と考えられる。

### 3.4 堆積状態

堆積状態は自然発火発生の有無を支配する極めて重大な要素と考えられている。しかし、実験室的規模の場合には堆積状態の数量的表示が可能としても、実規模の場合は形状、酸素流通性、熱流動性、水分などいずれをとっても正確な表示がむづかしく蓄熱性を明確にすることが出来ない。

このため一般には自然積みと圧縮積みという大別した分類にならざるを得ない。圧縮積みには、積上げ過程において順次フルトーザなどにより転圧する平積みの場合と自然積み（流し積みとも云う）完了時点では主風向側のみを転圧する場合がある。

堆積層内の蓄熱過程に関してはいくつかの研究があるが、ここでは外部より熱の供給を行った実験については省略し、常温から酸化熱の蓄積のみで昇温させた文献のみを紹介する。最初に行ったのは Lindenau<sup>29)</sup> の実験と思われるが、最近では伊木-樋口<sup>30)</sup> の実験がある。これらの内容については端的に説明することが困難なので、文献を参照されたい。

さて実際の野積み貯炭では圧縮積みが自然積みより有利であるが、どの程度有利かはよくわからない。日常の観測体制がのぞまれるゆえんである。

経験的には一山の高さは7~8mが限度とされており4m以下が望ましい。貯炭量は期間によっても異なるため50tとも20,000tとも云われはっきりしていないが、多くなる程危険性は大きくなる。

### 引用文献

- 1) H.H.Lowry:Chemistry of coal utilization 1, 1(1945)
- 2) 田代ら:石炭の自然発火に関する研究(第1報),採鉱と保安 20, 1(1974)
- 3) 橋本:自然発火発生理論,北鉱学会誌, 16, 1~2(1960)
- 4) 山崎ら:自然発火初期における石炭の発熱現象について,日鉱誌 71, 808(1955)
- 5) 佐藤ら:石炭の自然発火性と赤外熱映像による予知の可能性,日鉱会分科研資料(1981)
- 6) 星沢ら:石炭の低温酸化による発熱量低下に関する研究,燃料協会誌 52,
- 7) Rosin,P.:Braunkohle, 27, 241(1928)
- 8) Rees,W.:Kohle und Erz, 23, 1093(1926)
- 9) S.H.Li and S.W.Parr:Fuel, 8, 9(1929)
- 10) J.D.Davis and J.F.Byrne:T.I.M.E., 54, 197(1917~1918)
- 11) J.I.Graham:T.I.M.E., 54, 203(1917~1918)
- 12) Rorter,H.C.and Ralston,O.C.:U.S.Bur.Mines,Tech,Paper No113(1916)

- 13) N.Berkowitz and H.G.Schein:Fuel,30,94(1951)
- 14) D.J.Hodges and F.D.Hinsley:T.I.M.E.,123,211(1963~1964)
- 15) D.J.Hodges and B.Acherjee:T.I.M.E.,126,121(1966~1967)
- 16) Richters,E:Dingler's Polytech.,J. 190(1868)
- 17) B.Moors and F.S.Sinnatt:Fuel 4,194(1925),5,377(1926)
- 18) Petrenko,A.P:Report of the 2nd All-Union Conf. Moscow(1955)
- 19) 田代ら:自然発火抑制に関する研究 日鉱誌 89,1025(1973),90,1036(1974)
- 20) 伊木・樋口:常温附近における石炭の自然発火発生機構に関する研究 日鉱誌 89,1025(1973)  
· 90,1033(1974) 90,1036(1974)
- 21) 田代ら:坑内石炭の自然発火におよぼす水分の影響 日鉱誌 87,991(1971) 89,1029(1973)
- 22) Parr and Milner:Ind.Eng.Chem, 17, 115(1925)
- 23) L.D.Schmidt and J.E.Elder:Ind.Eng.Chem,
- 24) T.F.Winniford:T.I.M.E.,46,563(1913~1914)
- 25) Scott,G.S:U.S.B.M.Bulletin 455(1944)
- 26) 古谷・渡辺ら:石炭発火性に関する研究(第1報),北鉱学会誌 17,5(1961)
- 27) 磯部・佐藤:石炭の自然発熱性に関する研究(第1報) 日鉱誌 84,959(1968)
- 28) 田代ら:石炭の自然発火初期現象と空気中の酸素濃度との関係 日鉱誌 85,969(1969)
- 29) N.I.Lindenau:坑内火災の危険性の判定とその通気法, 国際鉱山保安研究所会議論文集
- 30) 伊木・樋口:前出 20)のうち 90,1033(1974)
- 31) 鈴木:石炭の自然発火対策, 白亜書房(1966)

#### 4. 自然発火の検知方法（早期発見法）

石炭の自然発火進行の過程は、石炭と空気中酸素の結合速度によって影響され、温度の低いうちには比較的ゆっくりとした現象であるが、温度が高くなるにつれて急速に火にまで進展する。一刻も早い時期に自然発火を発見してしまえば、対策に十分な時間を得ることができるし、有効な諸対策も開発されているので、自然発火はそれ程恐ろしいものではないともいえる。こゝでは、炭鉱坑内における石炭の自然発火早期発見法について概説し、船の場合を考察する。

平均的な自然発火の進行状態を表1.1.1に示す<sup>1)</sup>。このような進行過程をたどる現象を少しでも早い段階で発見するためには、石炭の自然発火発生時において平常時とは異なる徵候を検知する必要がある。これまで実用されている徵候としては、(1)温度上昇、(2)発生ガスの組成変化、(3)臭気の変化等がある。

表1.1.1 自然発火の進行状態<sup>1)</sup>

期間	温度(℃)	現象	発生ガス
緩慢な 酸化期間	25~30	局部温度上昇	石炭中の水分と吸収ガスを発散する。
	30~40	水蒸気発生、発汗現象	
	40~50	坑道乾燥、木材腐敗臭	
	50~60	排気にかすかなバラフィン臭	
初期発熱期間	60~100	温度上昇が速くなる。(特に84℃附近から急にはやくなる)	$H_2O$ , CO (80℃前後から), $CO_2$ (150℃前後から), $CH_4$ (250℃前後から) またエタン、エチレンなどを発生する。ガス量は温度上昇に比例して多くなる。
	100~150	温度上昇が一層急になる。自然発火特有の臭気増す。	
前期発熱期間	150~200	温度が急激に昇る。	多量の煙、種々のガスを発生する(上記のほか $H_2$ もある)
	200~300	石炭は少し分解し、刺激性の臭気が強くなる。	
後期発熱期間	300~500	石炭に着火し石炭の低温乾溜が起る。	ますます多量の煙およびガスを発生し最後に発炎する。
	500~800	石炭の第2次分解が起る。コーライトおよび発生ガスが燃焼する。	

##### 4.1 温度上昇検知による早期発見法

自然発火の危険性のある区域の温度上昇を何らかの方法で計測・監視することによって自然発火の発生を早期発見しようという考えは古くからあり、実施されて来た。

その主な器具、装置、方法を以下に述べるが、これらの方法の一大欠点は、石炭の熱伝導度が極めて低く、いわば断熱材的オーダーであるために、温度受感部が自然発火による高温域から少しでも離れた位置にあると、実際よりかなり低い温度しか示さず、発見が遅れる可能性があることである。

###### 4.1.1 各種温度計

自然発火の危険がある残炭や炭柱内に鉄管を挿入しておき、その内部に温度計をセットして温度上昇を観測するもので、温度計としては、アルコールや水銀温度計、熱電対、サーミスタ温度計、パイロメータ等が使われる。<sup>2)</sup>

#### 4.1.2 警報スイッチ

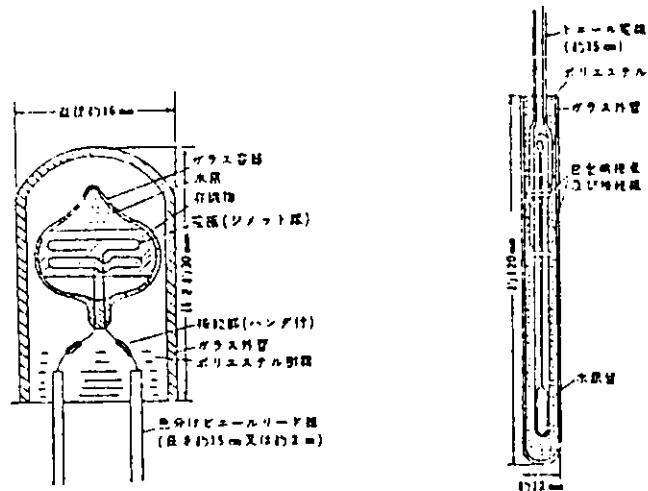


図 1.1.6 自動警報スイッチ<sup>3)</sup>

図 1.1.6 に示すような自動警報器とも呼ばれる部分を危険域に投入しておき、温度上昇がある一定値まで達すれば、自動的に電気回路を形成し、警報を発する考案がある。<sup>3)</sup>

#### 4.1.3 発臭式発熱警報器

導線を必要とせず、容易に埋設でき、経費も安価ということで、図 1.1.7 に示すような発臭警報器が試作されている。警報器付近の温度が上り熔融合金の熔融温度に達したとき、合金がとけて内

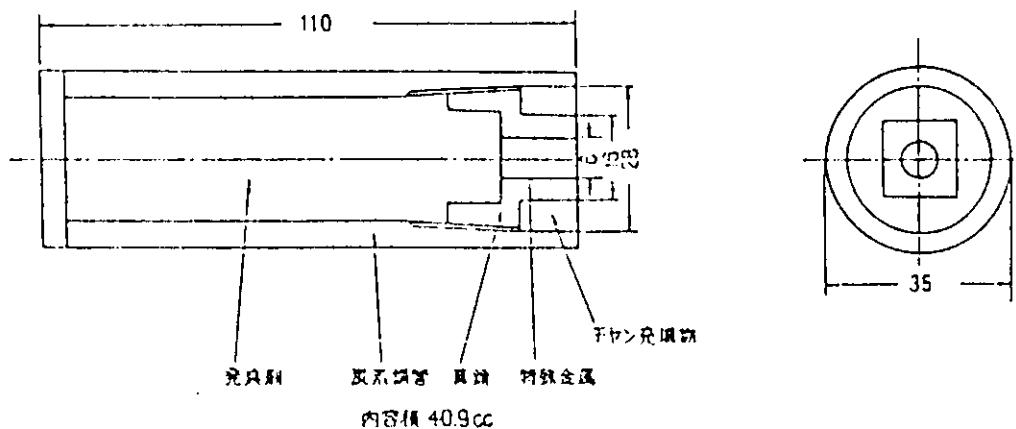


図 1.1.7 発臭警報器<sup>4,5)</sup>

部の香料が流出し、臭により作業者に警報するものである。熔融合金は最低 50 ℃以上であれば種々の温度に応じて選ぶことができる。

#### 4.1.4 差圧式発熱警報器<sup>4, 5)</sup>

すでに述べた温度上昇検知の諸方法は、点の温度を検知するのみであり、熱伝導率の低い石炭堆積体内部での最高温度を知ることが出来ることはまれである。そこで、適当な間隔で開けた小さな孔に熔融合金を熔接して気密にしたパイプを危険区域中に埋設し、パイプ内の気圧を外気より高くしておき、もし自然発火による高溫域ができると、その範囲内のパイプの熔融合金がとけて、パイプ内の圧力は大気圧に下がる。パイプに圧力計を接続しておけば肉眼によって自然発火の発生を検知できるし、これを自動警報化することも容易である。合金がとけて生じたパイプの孔を通してガスサンプリングを行ない、ガス分析によって確認することもできる。この方法は危険区域の監視を点から線へ拡大したことでの意味がある。

#### 4.1.5 热画像直視装置または赤外線映像装置<sup>6~10)</sup>

Probeye またはThermal Imager と呼ばれる装置により、「すべての物体は、各々の温度に従って赤外線エネルギーを放射している」という原理にもとづいて、危険区域の壁面の温度分布を色で見分ける方法である。この方法の場合にも、石炭の熱伝導率の低さが、壁面奥部の自然発火状況を知る上で障害となっている。

### 4.2 発生ガスの分析による早期発見法

石炭の自然発火過程で発生する各種ガス成分の濃度の増減に着目して早期発見を目指そうとする着想も古くからあり、現在も一般的に行なわれている。

#### 4.2.1 ガスサンプリング及び分析方法

サンプルガスは食塩水との置換もしくはスプレーによる吸引でサンブルピンに採取し、地上の分析器にかけられる。現在では大部分のガス分析に熱伝導度型検出器（T C D）及び水素炎イオン検出器型（F I D）を付けたガスクロマトグラフが用いられている。ただし、COに関しては赤外線吸収分析装置やメタンコンバータが用いられ、現場でのCOやC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>の分析には検知管が使用されている。

#### 4.2.2 指標となるガス成分

(1) CO 最も古くから着目され、現在でも自然発火の指標ガスとして最も重要なものと考えられている。<sup>11~16)</sup>

(2) C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> , C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>

エチレン、プロピレン等のオレフィン系ガスが早期発見の指標ガスとして有効ともいわれている。<sup>17~25)</sup>

(3) その他のガス

プロパン、ブタンさらに炭素数の多い炭化水素ガス及びベンゼン、トルエン、キシレンといった芳香族系ガスに注目した研究も行なわれているが、指標ガスとするには更に検討する必要がある。<sup>26)</sup>

#### 4.2.3 ガス分析結果例

炭鉱坑内に於ける通常密閉内と自然発火密閉内の空気組成を表4.1.2、表4.1.3に示す。<sup>27)</sup>両

表の比較から、自然発火時には、

(1) 微量成分と呼ばれる成分が全般的に多くなっている。

(2) COの発生がある。

(3) C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> , C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> , C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>といったオレフィン系炭化水素の発生がある。

などのことが見てとれる。

表 1.1.2 通常密閉内の空気組成<sup>27)</sup>

炭鉱別	主成分 (vol %)				微量成分 (ppm)								備考
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub>	CO	
A 炭鉱	43	80.8	6.4	8.3	11	—	tr<1	—	tr<5	tr<5	—	—	密閉後 2 年経過のもの
B 炭鉱	0.6	40.2	11.3	47.8	13.0	—	6.9	—	9.3	1.8	—	tr<1	密閉後 2 年を経過したもの

表 1.1.3 自然発火密閉内の空気組成<sup>27)</sup>

炭鉱別	主成分 (vol %)				微量成分 (ppm)								備考
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub>	CO	
A 炭鉱	19	78.1	8.2	11.7	22.0	15	52	8	13	7	tr<5	tr<1	密閉後約 3 年を経過したもの
B 炭鉱	0.6	25.4	9.8	63.9	115.0	>10	345	11.6	130	73.4	4.0	261	密閉後約 80 日を経過したもの

#### 4.2.4 早期発見のための指標

早期発見のためには各指標ガスの濃度を追うばかりでなく、複数のガス成分の濃度からある指数を計算によって求め、その値の変化を追跡した方が良いとの提案がなされている。例えば以下の 2 つがそれである。

##### (1) Graham 氏の指數

発生 CO / 吸収 O<sub>2</sub>

##### (2) アルカン比<sup>28~33)</sup>

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> / CH<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> / CH<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> / CH<sub>4</sub> など。

#### 4.2.5 システム及び機器の進歩

ガスのサンプリング方法ならびにその分析機器の進歩には著しいものがあるので、その幾つかについて触れる。

##### (1) 鉱山用簡易ガスクロマトグラフ<sup>34)</sup>

石炭の自然発火早期発見を目的としたガス分析では、対象となるガスはほぼ決っており、そう多くはない。従って、一般のガスクロの不要な部分をはぶき、小型で廉価なものが試作されている。

##### (2) 坑内ガスの連続監視<sup>35)</sup>

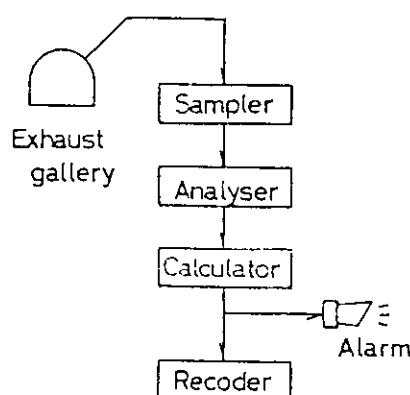
図 1.1.8 気流監視装置<sup>35)</sup>

図1.1.8に示した概念で、分析器としてはプロセスガスクロマトグラフ<sup>36)</sup>、CO分析用赤外線分析計<sup>34~40)</sup>を用い、計算機による分析結果の判断に基づき警報を発生させるシステムが開発されている。<sup>41)</sup>

(3) Tube Bundle System<sup>42)</sup>

上記坑内ガスの連続監視システムのうち、ガス採取のための吸引ホースを自然発火の危険性がある坑内各所まで延長し、この吸引ホースを東ね地表の分析所へ導く方法で、この名称で呼ばれている。

(4) その他の

ガスクロマトグラフィーの分析時間の短縮<sup>43)</sup>、新型のCO検知器<sup>44、45)</sup>、ポータブル形で簡便な分析計の開発<sup>46)</sup>などがなされている。

### 4.3 臭気の変化による早期発見法

表1.1.4に示すように、自然発火箇所の温度によって、発生する臭気が異なることを利用するものであるが、経験を積んだ坑内係員によれば、かなりの精度で進行の程度及び発火箇所を特定できるし、实际上坑内での自然発火の過半数は臭気の異常によって発見されているのが、実状である。欠点としては、臭気の感じ方及び表現には個人差があることで、ガス分析によって得られた組成と臭いの結び

表1.1.4 自然発火にともなう臭気<sup>49)</sup>

臭 气	原 因	推定温度℃
古 臭	バクテリアの酸酵	40~60
腐 敗 臭	有機物の腐敗	40~60
酸 味 臭	芳香族有機酸の形成など	80~200
芳 香 臭	有根酸エステルの形成など	80~200
甘 酸 臭	酸味臭、甘味臭の合成	80~200
にんにく 臭	アミン類など窒素化合物による	80~200
池 タ ー ル 臭	パラフィン、ナフサ、タールなどによる臭気で石炭分解	200~300
木の煙ゆる 臭	初期のもの、特に石炭酸の臭気は強い	
刺 激 臭	パラフィン、ナフサの分解、酸化などで強烈な刺激臭	

付きを求める研究もなされているが<sup>47、48)</sup>、石炭の種類により違いもあるようで、結論を得るには至っていない。

以上、主として炭鉱坑内における石炭の自然発火早期発見法について概説したが、これらの中の幾つかは舶用の貯炭槽及び運炭装置系にも応用可能と思われる。一般的に言えることは、温度計測による方法は、石炭の熱伝導度が極めて低いために、真の最高温度及びその位置を知ることが難しい場合が多く。また、ガス分析による方法については、危険箇所ごとに関与している石炭の量、通気量、ガスサンプリングの位置など諸条件が異なるために、一時点でのガス分析結果のみからは、自然発火の進展の様子を知ることができない場合があるので、平常時からの連続ガス分析の結果に照らして異常を判定することが望ましい。

## 引　用　文　献

- 1) 佐山総平編, 採鉱採炭ハンドブック, p. 719
- 2) 「石炭の自然発火早期発見用抵抗温度計」  
ラスボーリン・ゲー・ヤー, コズロフ・エム・カーナ, フォファノフ・エー・デー;  
(ベゾバースノスチ・トウルダ・フ・プロミーシュレンノスチ「産業労働安全」) 12 (10), 42~43  
('68)
- 3) 山田 機編集, 鉱山保安ハンドブック, p. 181
- 4) 通産省鉱山保安局, 新技術懇談会自然発火部会編, 自然発火の早期発見法と防止対策, p. 25,  
昭和44年6月
- 5) 自然発火早期発見のための新しい機器  
東 猛: 炭鉱保安情報 (22) 6-16 ('69)
- 6) Remote sensing of potential spontaneous combustion in the Somerset mine,  
Somerset, Colo., STATEHAM R M: P999A P B (USA) [PB234061] 13p ('74)
- 7) Thermal infrared imagery of the Burining Mountain coal fire, ELLYETT  
C D FLEMING A W : C252B Remote Sensing Environ (U.S.A) 3 [1]p. 79~86,  
('74)
- 8) 「熱放射型自然発火検知器」  
チュントウ・ゲー・イー, デンデュク・ゲー・ヴェー, チェメリク・ヴェー・エル, ダリケヴィッヂ・ヴェ  
ー・エム, ジークン・ゲー・アー; (ベゾバースノスチ・トウルダ・フ・プロミーシュレンノスチ「産業労  
働安全」) 16.4 p 27~28, ('79)
- 9) 光波を用いた鉱山保安計測に関する研究 II 赤外熱映像による岩石・石炭温度計測の基礎試験  
佐藤千城, 吉田豊, 後藤竜彦(室蘭工大); 西辻昭(北大応用電気研)  
日本鉱業会春季大会講演要旨集 1980 p.139~140
- 10) Low-temperature oxidation of a bituminous coal pile  
BOUWMAN R, FRERIKS  
Fuel Vol. 59, 165 p. 315-322 '80
- 11) 「自然発火の早期発見と予防」  
ペロー・ボル・アーノ・エヌ, ブロホロバ・ゼー・エフ, チェルビンスキイ・エー・デー;  
(ベゾバースノスチ・トウルダ・フ・プロミーシュレンノスチ「産業労働安全」) 12 (11), 22~25  
('68)
- 12) ガスクロマトグラフを利用した自然発火の早期発見と予防対策  
野田 久人: 九州炭鉱連会誌 22 (3), 79~86 ('69)
- 13) 「自然発火初期発見作業の効率向上可能性」  
イギシェフ・ヴェー・ゲー, スハノフ・ゲー・ヴェー;  
(ウゴリ「石炭」) 46 (5), 60~62 ('71)
- 14) 「自然発火の空気力学的探知試験」  
ペラベンツ・エフ・エル・ベー, ミラー・ユー・アー, (ベゾバースノスチ・トウルダ・フ・プロミーシ  
ュレンノスチ「産業労働安全」) 15 (7), 36~37 ('71)
- 15) Rechtzeitige Erkennung von Grubenbränden mittels schreibender  
CO-Messgeräte

CIESZYNSKI G, STADT K-M, WOLFF H: Bergakademie 22(9) 538-542 ('70)

- 16) 自然発火傾向の指標としてのCOとCO<sub>2</sub>  
Kohlenmonoxid und Kohlendioxid als Indikatoren für die Selbstentzündungsneigung BARTH W: BO 61 Glueckauf Forschung 34(4), 153~157 ('73)
- 17) 石炭の自然発火初期過程における発生ガスの研究, 江淵藤彦, 河野静夫, 荒牧寿弘: 日本鉱業会春季大会講演要旨集, p. 43~44 ('69)
- 18) 石炭の自然発火初期過程における発生ガスの研究 Ⅱ  
江淵藤彦, 河野静夫, 荒牧寿弘: 日本鉱業会春季大会講演要旨集 1970 41~42 ('70)
- 19) 石炭の自然発火初期過程における発生ガスの研究 Ⅰ  
江淵藤彦, 河野静夫, 荒牧寿弘: 日本鉱業会秋季大会分科研資 1~4 ('70)
- 20) 大型炉による自然発火の基礎的研究  
柳本竹一, 内野健一, 小松正樹, 田代正俊: 日本鉱業会秋季大会分科研資 11~13 ('70)
- 21) 炭質と発生ガスの関係  
江淵藤彦, 河野静夫, 石藏利昭, 荒牧寿弘: 日本鉱業会春季大会講演要旨集 1971, 171~172 ('71)
- 22) 堆積層の温度分布と発生ガスについて  
松隈喜綱, 青柳 博, 松浦茂雄, 井清武弘, 鈴木 忠(公害資源研・九州): 日本鉱業会秋季大会分科研究会 1972 (A/S), N-3, 1~4 ('72)
- 23) 石炭の自然発火に伴うエチレンの低温域における発生挙動  
後藤研, 河野静夫, 荒牧寿弘(九大・生産科研)  
S 394B 日本鉱業会研究業績発表講演会講演要旨集 Vol. 1976 p. 84~85 ('76)
- 24) 石炭の自然発火に伴う炭化水素系ガスの低温域における発生挙動  
後藤研, 河野静夫, 荒牧寿弘(九大・生産科研)  
F 463A 日本鉱業会誌 Vol. 93, № 1077 p. 869~872 ('77)
- 25) The ambient temperature oxidation of coal in relation to the early detection of spontaneous heating  
CHAMBERLAIN E A C, HALL D A, THIRLAWAY J T: Mining Engr 130 (121) 1~16 ('70)  
(周囲温度における石炭の酸化と自然発火の早期発見との関係)
- 26) 炭鉱別石炭試料の温度上昇に伴って発生する微量ガス成分と臭気 石炭の自然発火の早期発見に関する研究(第1報): 小田仁平次, 近藤善資; 日本鉱業会誌 Vol. 97, № 1120, pp. 445~450 ('81)
- 27) 九州炭鉱保安技術審議会, 自然発火委員会編, ガス分析による自然発火の判定と防止対策, p. 55
- 28) 石炭の自然発火早期発見について, アルカン比による坑内ガス分析結果の解析  
田代 裕, 河野 信: 日本鉱業会秋季大会分科研資 (E) 5~9 ('70)
- 29) 石炭の自然発火初期における発生ガスアルカン類による自然発火進行の推定  
田代 裕, 河野 信, 菊地 昭, 高桑 功: 日本鉱業会春季大会講演要旨集 1970 39~40 ('70)
- 30) アルカン類の比による坑内石炭の自然発火早期発見法 石炭温度と発生ガスについての実験  
田代 裕, 河野 信, 高桑 功: 日本鉱業会誌 87(999) 395~400 ('71)
- 31) 石炭自然発火の進行とアルカン類の比との関係 石炭温度と発生ガスの関係 Ⅱ  
田代 裕, 河野 信, 菊地 昭, 高桑 功(公害資源研・北海道): 日本鉱業会春季大会講演要旨集 1974 157~158

- 32) 自然発火早期発見のための指標ガス  
 田代 褒，河野 信，菊地 昭，高桑 功： 日本鉱業会秋季大会分科研究会講演集  
 1974, J-4 1~4
- 33) 石炭自然発火の進行とアルカン類の比 石炭温度と発生ガスの関係 Ⅱ  
 田代じょう，河野 信，菊地 昭，高桑 功，横山伸や（公害資源研） 日本鉱業会誌 Vol. 95,  
 No. 1100 PAGE. 727~731 '79
- 34) 4)と同じ p.27
- 35) 27)と同じ p.26
- 36) プロセスガスクロマトグラフによる坑内ガスの自動連続計測 JA  
 江淵藤彦，後藤 研，河野静夫，荒牧寿弘（九大・生産科研）： 日本鉱業会誌 91(1050),  
 521~526
- 37) Continuous monitoring of mine gases STONES B W:  
 Colliery Guardian (GBR) 223(1) 13~19, 22, 24
- 38) 炭鉱における一酸化炭素監視システムの管理  
 The control of carbon monoxide monitoring systems in mining,  
 JONES K, LEE J, MONTGOMERY A M: Mining Engr 133 [156] 29~39
- 39) The automatic monitoring of carbon monoxide in the ventilating air of  
 British coal mines for detection of fires. CHAMBERLAIN E A C,  
 CROOK M D, GYPATKIN G H R : Papers IFAC Symp Autom Control  
 Mining Mineral Metal Process Sydney 173~181
- 40) The practical early detection of spontaneous combustion.  
 CHAMBERLAIN E A C, HALL D A Colliery Guardian 221(5) 190~194 ('73)
- 41) Bessere Füherkennung von Grubenbränden mit Kleinrechnern. EICKER H,  
 KARTENBERG H J: Glückauf (DEU) 111[2] 59~63
- 42) The continuous monitoring of mine gases : the development and use of a  
 "tube bundle" technique CHAMBERLAIN E A C, DONAGHUE W R, HALL  
 D A, SCOTT C: Mining Engr 133[160] 239~251 ('74)
- 43) A three-minute gas chromatographic analysis of the main constituents  
 of mine atmospheres. LANG H W, FREEDMAN R W : PB213968 p.12
- 44) 「新型のCO検知器」  
 アグラモワ・エフ・アール，エラハリリエブチ・ペー・ハー，ストレイマン・ペー・エー；  
 (ウクライナの石炭 [8] 42~43, ('73))
- 45) Developments in Mining Science, with Reference to the Detection of  
 Spontaneous Combustion ; S. J. CRIDDLE; The Mining Engineer, July  
 ('81), p. 47~52
- 46) Bureau of mines gas detection sensor research. SCHNAKENBERG C H:  
 K740051 W V U Conf Coal Mine Electrotechnol (USA) 19, 1~19, 13 ('74)
- 47) 炭層別石炭試料の温度上昇に伴って発生する微量ガスと，“Vにおい”  
 小田仁平次（石炭技研），成瀬一郎，有馬清途（住友石炭鉱業北海道技研）：日本鉱業会誌 88(1017),  
 787~792
- 48) 26)と同じ
- 49) 伊木正二編；炭鉱保安便覧

## 5. 自然発火の防止原理

### 5.1 防止原理

#### 5.1.1 自然発火発生のための必要時間

堆積層内に流入する空気中の酸素が消費されて、その間での反応が比較的ゆっくりと進展する自然発火の初期段階では、発生する熱量も少なく、温度上昇量も小さいので、その近傍での熱の移動がほとんどなく断熱的な状況にあると考えられる。このような雰囲気内で石炭の酸化がすんで石炭層の一部の温度がその着火温度を越えるまで反応が進展する状況を想定すれば、それに必要な時間( $t$ 時間)は、近似的に

$$t = \int_{T_f}^{T_i} \frac{C_f \cdot \rho_f \cdot e^{-E/RT}}{Q \cdot f(P, S, \dots) \cdot A} dT \quad \dots \dots \dots \quad (a)$$

であたえられる。

ここで、 $C_f$  は堆積層内で自然発火の発生が想定された部分の石炭(以後、単に“石炭”とあらわす。)の比熱(kcal/kg °C)であり、 $\rho_f$  は石炭の比重(kg/m<sup>3</sup>)であり、 $Q$  は単位量の酸素を消費するときに発生する熱量、すなわち、石炭の酸化熱(kcal/mol oxygen reacted)であり、 $f(P, S, \dots) \cdot A \cdot e^{-E/RT}$  は単位容積の石炭が単位時間に消費する酸素量であらわした反応速度(g · mol of oxygen reacted/hr · m<sup>3</sup>)である。さらに $f(P, S, \dots)$  は石炭の反応性に關係する要因、たとえば空気中の酸素濃度や石炭の表面積や孔隙性などを考慮した係数であり、 $A$  は頻度係数、 $E$  は活性化エネルギー、そして、 $R$  はガス常数である。

この式は、外部からの熱の出入がないような石炭堆積層内で、石炭の酸化によって発生する熱が全部蓄積されて、温度上昇に費やされ、上昇する温度が石炭と酸素との反応速度をアレニウスの式にしたがって支配するとしたとき、石炭がその初期の温度 $T_f$ (°C)からその着火温度 $T_i$ (°C)を越えて自然発火の発生があるとしたときの熱の收支を考慮して作られた式である。

適当な対策が講じられて、たとえば $C_f \cdot \rho_f$  を大きくでき、石炭と空気中の酸素との反応速度 $f(P, S, \dots) \cdot A \cdot e^{-E/RT}$  が極く小さくでき、この $t$ を無視大に近づけることができれば自然発火の発生を完全に阻止できる。また、所定の採掘区画で採炭が終了して充分に対策が実施されるまでの時間、あるいは、船舶などによって石炭が長距離輸送されるときは目的地に到着して荷おろしが完了するまでの時間、そして貯炭場などに堆積されて使用に供されるときは酸化による熱の蓄積に充分でない残炭量になるか、定期的に行われる防止対策が行われるまでの時間などより大きくできれば、実施された対策は自然発火防止対策として充分であるといえる。

#### 5.1.2 自然発火発生のための必要空気量

これまでのべてきたように、石炭の自然発火は酸化反応の結果である。供給される酸素量が多いほど、その間の反応は活発で、反応速度したがって発熱量が大きくなり、石炭が充分な量存在すれば、自然発火の可能性が酸素量の少ない場合にくらべて大きくなる。石炭の酸化反応、いいかえれば自然発火するとき酸素の輸送担体は空気である。すなわち、充分な酸素を含んだ空気が適当な流速で必要な時間、石炭層内に流入させられた時、自然発火を招く。

今、単位量の酸素を消費して $Q$  kcal という発熱量をあらわす石炭が、初期の雰囲気温度 $T_f$ から着火温度 $T_i$ を越えて上昇し、自然発火が発生するまで必要とされる空気量 $A_s$ (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)は、

$$A_s = \frac{\rho_f \cdot C_f \cdot (T_i - T_f)}{Y \cdot Q \cdot (1 - L)} \quad \dots \dots \dots \quad (b)$$

のように、近似的にあたえられる。

この式は、石炭が酸化反応を営むとき、供給される空気中の酸素量の $Y$ （%）を消費し、発生した熱の $L$ （%）が何等かの原因で逸散されて、石炭層の温度上昇に加わらないものとしたとき、石炭が着火温度を越えるのに必要な熱量を放出するため、自然発火過程を通じて消費する空気量、すなわち、自然発火発生のために供給される空気量をあたえる。

この量を厳密に計算するのには、色々問題はあるが、特に重要なのは燃焼状態が発生するために最小必要な石炭量（Coal availability）である。ここでは、それが充分満たされているものとしている。

たとえば、何等の対策によって $Y$ を小さくでき（対策上からは空气中で酸化に利用される酸素の量を小さくするという考え方をする）、 $L$ を大きくでき、あるいは、石炭の着火温度を高めることができて、（b）式であたえられる $A_s$ を無限大に近づけられれば、酸化、発熱があって燃焼状態をもたらすために無限大の空気が必要であることになり、实际上自然発火しないと考えてよい。

しかし、現実的には、むしろ、 $A_s$ のこの式で得られた値より小さな値の供給量しかないように条件を control してやることの方が可能性が大きい。

## 5.2 自然発火防止対策の実際

(a), (b)の両式を検討すれば、自然発火発生にかかる要因のなかで、特に重要なものとして石炭の酸化性、供給される空気量および堆積される石炭層の状態などがあげられる。これらの要因は、たがいに交絡しあって、自然発火過程を複雑に進歩させるので、そのうちいずれが決定的であるということはできない。自然発火の防止対策を考えるときにも、これらの要因のほとんどを備えた状況のもとの現象過程の抑制、終息をめざさなければならないので、選択的に対応する手段を選んで、それによって最終的に満足できる結果が得られるようになる。

現在、実施されて成果を挙げている方法もあるし、実施の可能性が研究されている方法もある。ここでは、原則的に、重要な方法として

- (1) 供給される空気に関連する方法
- (2) 熱の蓄積したがって温度上昇を抑制する方法
- (3) 石炭の酸化性を抑制する方法

などをあげる。

(1) 供給される空気に関連する方法：堆積する石炭層の酸化反応を抑制するためには、堆積層内に浸透、流入する空気を完全に遮断してしまうか、酸化反応の継続のために最低必要な空気量以下に抑えてしまうか、あるいは流入、浸透する空気中の酸素を、たとえば炭酸ガスや窒素などの不燃性ガスで置きかえて酸化反応が維持できる能力をなくしてしまうか、などの方法が考えられる。これらの方法は、いわゆる空気遮断法（密閉法）や低酸素濃度法などとよばれて実際に行われている方法である。

石炭が酸化反応を継続して自然発火にいたるまでに必要な風量は、(b)式で推測されるが、単純に考えても石炭が消費する酸素量や逸散する熱量、あるいは、石炭の着火温度などがそれぞれ異なるので、たとえ、自然発火の発生をもたらすのに充分な石炭量が同じ状態で堆積されていたとしても、一義的には決められない。

石炭と酸素との間の反応は一次反応と考えられるので、空気中の酸素濃度が高いほど反応は活発にすむ。酸素濃度が 20 % のときと 10 % のときとでは、その反応速度に、3 ~ 4 倍ほどの差が認められ、それ以下の濃度では自然発火の発生はなくなるとされる酸素濃度下限値は、石炭層のおかれた雰囲気温度と供給される風量などに影響されるが、雰囲気温度 30 ~ 40 °C のときで、酸素濃度を 10 % 以下に抑えると酸化の初期の段階で反応を可成り抑制できるといわれ、最終的に燃焼状

態への到達をなくすのには 5 % 以下の濃度にすべきであるといわれる。

酸素濃度を減少させれば、供給される風速すなわち風量を増しても酸化過程の進行を抑制でき、自然発火の危険限度以下でおさえられる。一例によると酸素濃度が 18 % 以下であると 10 m/h 以下、そして濃度を 15 % 以下にすると 30 m/h 以下の風速に維持できればよいという。

炭鉱では、石炭を採掘した跡に空気が入らないように密閉するのが一般的であり、そのような密閉領域内では酸素濃度を 8 ~ 10 % 以下に維持でき、メタンガス、炭酸ガス、窒素などの濃度が高くなつて、石炭の酸化反応を促進する他の条件がとくにあっても自然発火は終息する方向にむかうとされる。

炭鉱坑内で自然発火の早期の終息を目的として、密閉内に、液体または固体の炭酸ガスを注入したり、窒素ガスを注入したりする場合がある。これらのガスの注入は密閉内空気中の酸素濃度を減少させて、その助燃性を奪うということと同時に気化にあたつて膨大な気化熱を奪つて密閉内の温度を下げ、いわゆる冷却効果によって消火を促進しようという考えも含まれる。

(2) 熱の蓄積したがつて温度上昇を抑制する方法：堆積層内に空気が流入して石炭の酸化が起つても、いわゆる燃焼状態が認められるようになるのは、空気と直接接して酸化反応が最も活発に起つる堆積層表面よりはある程度奥部に入った個所であることは実験室でも現場でも普通に経験する処である。それは空気の冷却能力が充分で熱の蓄積したがつて温度上昇が妨げられるからである。しかし、強制通気を行つてその冷却作用を利用して自然発火の抑制することは实际上可成りむずかしい。

石炭の自然発火過程において、反応の進展に伴つてたとえば付着水分を気化させて、それが起つっている間温度上昇がおさえられるという現象が観測される。

このように石炭の酸化に伴つて温度上昇過程の比較的低い温度で、たとえば使用した物質の保有する水分を気化放出させたり、熱分解をして吸熱反応を営み酸化によって発生する熱を消費し堆積層の温度上昇をおくらせて、(a)式の  $t$  を大きくしようという考え方がある。たとえば塩化マグネシウム、塩化アンモニウム、硝酸、硝砂などの無機薬剤を炭層内への注入剤として注入し、それらの薬剤の分解、水分放出とともに吸熱による抑制効果を期待したもののが炭壁注入剤である。

この中には(a), (b)の式で見られる  $C_f \cdot \rho_f$  すなわち堆積層の温度を  $1^{\circ}\text{C}$  上昇させるために必要な熱量を大きくして、酸化熱を消費させ温度の上昇を抑制すると同時に炭層の不燃化をねらった注入剤などもある。この目的に使用される物質のなかには、いわゆるすぐれた着火温度上昇効果をあらわし、(a)式における  $t$  の増加に役立つものもあるが、分解にあたつて有害ガスを放出するものや使用燃焼時にマイナスになるものもあるので使用には注意する。

(3) 石炭の酸化性を抑制する方法：大きな湿潤性をもつていて水溶液、またはそのままで使用したとき、石炭表面をその物質で完全に被覆し、空気中の酸素が石炭表面に到達するための拡散過程で長い時間を必要とするか、石炭表面への酸素の到達を完全に遮断できれば、自然発火の抑制に大いに役立てられる。このような性質をもつた物質として、まず考えられるのは、界面活性剤である。

界面活性剤の進歩は極めて著しく、特徴をもつたものが数多く作られ、それぞれの目的に利用されている。現在、界面活性剤を実際に自然発火の抑制に利用している例はない。しかし、実験的に界面活性剤水溶液中に石炭を浸漬、乾燥させたものについて酸化過程におかれたときの石炭の着火温度への影響、酸素消費量から反応速度常数を求めあるいは自然発火の指示ガスとして利用される一酸化炭素の生成量と消費酸素量の比の値を計算して、その効果を実験的に明かにした例はある。

数多くの界面活性剤を用いて行った実験的研究の結果現在までの処では、着火温度増加率や一酸化炭素濃度の抑制能力などから見てかなり効果が認められた界面活性剤も数種見いだされているが、使用上の問題などがあつて明確な結論までにはいたっていない。

この種の物質の中には、ある温度で酸素を消費し一酸化炭素を放出して分解するという性質をもつものがある。この時の反応が吸熱反応で温度上昇の抑制に役立つものであれば極めて好都合であるが、現在のところではそのような性質をもった物質が見出されていない。

さらに、この種の物質の石炭のぬれ効果を利用し、比較的低温で分解して大きな吸熱反応をあらわす物質や特定の抗酸化剤などの堆積内への浸透や石炭の表面被覆の程度を大きくしようという発想もある。

ここでは、自然発火防止対策について炭鉱現場で実施されている方法よりはむしろ防止原理について自然発火過程をある程度モデル化してのべた。それは原理を詳細に検討すれば、実施さるべき方法が明かになるし、炭鉱現場などで実施される方法がそのまま船舶輸送などに応用できるかどうかを危んだからである。

石炭焚き船の自然発火防止対策としては、ボイラーの燃焼排気ガスの石炭貯槽への導入が考えられる。この方法は既にオイルタンカー等に採用されていて、技術的にはそれ程問題はないと思われる。

ただし、イナートガスの性状については、石炭焚きボイラーの燃焼排気ガスは重油焚きボイラーのそれよりも硫黄分は少ないが、酸素量が多いことがありうるので、実施に当っては十分検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) O. Levenspiel: Chemical reaction engineering . New York , Wiley (1972)
- 2) G. S. Scott: Anthracite mine fires; Their behavior and control.  
U.S. Bureau of Mines Bull. #455 (1944)
- 3) Van Krevelen: Determination of the reactivity of coal by empirical methods. Elsvier (1961) pp. 321～335
- 4) S.C. Banerjee, B.D. Banerjee & R.N. Chakravorty: Rate studies of aerial oxidation of coal at low temperature. Fuel London (1969) pp. 324-331
- 5) P. Versmee: Le rôle prépondérant des éléments biologiques dans l'origine des feux de mines. Revue de L'industrie Minerale, Mars (1967) pp. 169-222, Sept. (1969) pp. 743-769
- 6) L.K. Strange: Ignition; Key phase in combustion recovery. Petroleum Engi. Nov. (1964) pp. 105 - 109
- 7) H.J. Tadema & T. Weijdema: Spontaneous ignition of oil sand. The oil and Gas Journal, Dec. (1970) pp. 77 - 80
- 8) J.N. Dew & W.L. Martin: Air requirements for forward combustion, Petroleum Engi., Dec. (1964) pp. 82-86, Jan. (1965) pp. 82-85
- 9) L. D. Schmidt & J. L. Edir: Atmospheric oxidation of coal at moderate temperature, rates of the oxidation reaction for representative coals. Ind. Eng. Chem., 32, 249 (1940)
- 10) W. L. Weis & A.A. Orning: Reactivity of solid fuels influence of oxygen partial pressure. Fuel London, 32, 435 (1953)
- 11) H. Munzner und W. Peters: Ergebnisse neuerer Untersuchungen über das Selbstentzündungsverhalten von Steinkohlen. Erdöl & Köhle,

Erdgass petrochemie, 22, 6 (1969)

- 12) N. I. Lindenau & V. M. Maevokaja: Détermination de la susceptibilité au feu des quartiers de dépilage et leur régime d'aérage. Revue de L'industrie Minerale, Dec. (1964) pp. 1077 - 1088
- 13) Kurihara & Tashiro : Prevention of spontaneous heating of coal by solution of surface active agents. Internat. Conf. of Safety in Mines Res., Tokyo (1969)
- 14) E. A. C. Chamberlain & D. A. Hall: The ambient temperature oxidation of spontaneous heating. The Mining Engineer Oct. (1970) pp. 1 - 16, May (1973) pp. 387 - 399
- 15) 赤尾, 佐藤, 大塚: 2, 3の無機薬剤が石炭の着火温度に及ぼす影響について, 日鉱誌, 昭和33年 Vol. 74, No. 837, pp. 159 - 163
- 16) 大塚: 自然発火抑制のための炭壁注入剤の研究, 日鉱誌, 昭和37年, Vol. 78, No. 889, pp. 511 - 517
- 17) 波止, 鈴木: 盤崎坑における坑内自然発火の防止対策に関する研究. 第3報薬品による自然発火抑制について, 常盤技報保安特輯第2号, 昭和33年, pp. 1 - 12

## 6. 自然発火の消火方法

石炭自然発火の消火方法といつても、自然発火の抑制方法あるいは通常の坑内露出火災の消火方法と重複する部分もあり明確に区別することはできないが、ここではそれらの重複を承知で記述を進めることにする。

石炭自然発火の消火方法に関するこれまでの研究の大部分は炭鉱における自然発火を対象にしたものである。その他に石炭ヤードにおける石炭自然発火を取扱ったものも一部見られるが、石炭を燃料とする船舶に直接応用できるものは見当らない。このためここでは、炭鉱関係の自然発火の消火方法についての最近の研究を文献から調べて列挙し、最後に船舶内の石炭貯蔵槽内の自然発火の消火への応用性について述べることにする。

### 6.1 不活性ガスによる方法

現在までに炭鉱における自然発火に実際に使用されたガスとしては  $N_2$  と  $CO_2$  が挙げられる。実用例は英國、西独およびソ連に見られるが、その中で比較的最近のものとして次のものがある。

英國の Daw Mill 炭鉱では'80年10月に長壁採炭切羽の自然発火の抑制のために  $N_2$  を払跡内に注入している。<sup>1)</sup> この報告では同炭鉱の切羽自然発火問題の検討と  $N_2$  注入採用に至った経過を詳述し、経済性の評価も合せて実施している。

西独では  $CO_2$ 、灯油燃焼跡ガスおよび  $N_2$  による炭鉱坑内の露出火災を検討し、 $N_2$  が最も適切であると結論している。<sup>2)</sup> この報告では  $N_2$  の輸送、注入方法を詳しく検討すると共に、西独における使用実例を紹介している。これは露出火災を対象としているが自然発火への応用も可能である。

米国の Freeman Coal Mining Corp. 社の Orient No. 3 炭鉱においては払跡の石炭自然発火を抑制するために  $CO_2$  を注入して効果を挙げている。<sup>3), 4)</sup>

特異な例としては、石炭コンビナートでの自然発火対策の研究がある。<sup>5)</sup> この報告では  $N_2$  等の不活性ガスによるシールが最も効果的であるが、経費が高いために泡あるいは  $CO_2$  自動消火設備が適しているとしている。

以上の例の他にソ連においても坑内火災あるいは自然発火の消火に  $N_2$  注入法を採用している。

### 6.2 化学物質による方法

英國の Chamberlain は各種の石炭自然発火抑制剤について研究し次のような結果を得ている。<sup>6)</sup> モンタンパウダは常温から 200°C の範囲では極めて抑制効果が大きく、四ほう酸ヒドラジアンモニウムやほう酸塩は 150°C 以上で抑制効果を示した。さらにはほう酸塩に界面活性剤を添加するとモンタンパウダよりも効果があったと報告している。これらは自然発火の消火というよりむしろ発火に至る前の予防剤と考えられる。

西独では塩化カルシウム粉末によって自然発火の抑制を実施しており、<sup>7)</sup> ソ連では坑内、露天掘ベンチにおける自然発火の抑制並びに消火に、塩化カルシウムと石灰、粘土の混合液を散布、注入して効果があったと報告されている。

山尾らの研究によると塩化マグネシウムを添加したペントナイト泥水が坑内火災、特に石炭火災の消火に優れていることが判った。

### 6.3 水、泥水等による方法

泥水による方法は一部 6.2 で既述したが、泥水や無機被覆材によって自然発火を消火する方法の研究や実例はソ連の文献に多く見られる。

ソ連ではボタ山の自然発火の消火に注水や粘土質土砂による消火がさかんに実施されている。中にはターボジェットモータを装備した散布機を使用し、ボタ山の表面に土砂を散布して火災を消火する試験

も実施されている。

#### 6.4 密閉(気圧均衡)による方法

炭鉱において自然発火を直接消火できなくなった場合に最終的な手段として採用されるのが密閉である。これは自然発火が生じている部分への空気の流入を阻止し、酸素欠損による消火を目的とした方法である。この際、密閉壁を二重構造とし、壁間の圧力を密閉内部の圧力と均衡させ、差圧による密閉内部への空気流入を阻止する方法が気圧均衡法である。気圧均衡法と注水あるいは注泥を組合せた自然発火の研究をソ連では活発に行っている。

#### 6.5 その他の方法

一般火災に採用される全ての消火方法はある程度石炭の自然発火の消火に使用することは可能であるが、空間あるいは場所による制限があること、石炭の自然発火は炭鉱では通常表面から見ることができない潜伏火災であること等からそのまま応用されていない。

このため一般火災に採用されている方法で炭鉱での石炭自然発火の消火に見られるのは注散水位であるが、特殊なものとしては多量に発生させた泡沫を坑道に沿って流送する消火方法がある。

また、最近では米国や日本においてハロゲン炭化物（例えはハロン）等の消火効果の大きな特殊ガスの応用が研究されており、近年中に実用化が期待される。

以上、炭鉱を主体として石炭自然発火の消火方法を述べたが、これらの消火方法で直接に船舶の石炭貯槽内の自然発火の消火に適用できるものはない。しかし、船舶の石炭貯槽は限定された空間であり、消火の面から考えると炭鉱の場合より条件は数段よいと考えられる。

船舶の石炭貯槽の気密度は炭鉱坑内のそれより良好あるいは良好にすることが可能であること、石炭の消火剤（あるいは材）による汚染を避けた方が良いこと等を考えると、船舶石炭貯槽内の石炭自然発火の消火方法としては不活性ガスを使用する方法が最適と考えられる。どのような方式を取るかは、石炭貯槽の構造あるいは船内構造に大きく左右されるため今後の研究課題となる。

### 引　用　文　獻

- 1) L. Harris: The use of nitrogen to control spontaneous combustion heatings, Mining Engr., Vol. 140, №141, pp. 883~892 (1981)
- 2) W. Both : Fighting mine fires with nitrogen in the German coal industry, Mining Engr., Vol. 140, №236, pp. 797~804 (1981)
- 3) P. M. Budzak and G. R. Eadie : Controlling mine gob fires, Mining Congr. J., Vol. 48, №7, pp. 39~42 (1962)
- 4) \_\_\_\_\_ : Gob fire—control, or extinguishment, Coal Age, Vol. 67, №4, pp. 118~122 (1962)
- 5) A. Rado' und A. Gombos : Das Erkennen und Bekämpfen von Grubenbränden in Steinkohlenkombinate "Mecsekis Szénbányák", Freiberg. Forschungsh. A. (DDR), Nr. 614, s. 61~66 (1979)
- 6) E. A. C. Chamberlain : Spontaneous combustion of coal. An investigation of inhibitors and promoters, Coll. Guard. Vol. 22, №3, pp. 79~82, (1974)
- 7) W. Externbrink und H. Lewer : Keine Selbstentzündung von Feinkohle im

## ま　と　め

石炭だき船における石炭の自然発火防止という視点から、主として炭鉱における自然発火関連の文献を基にして、炭質及び環境条件と自然発火との関係、自然発火の検知方法、防止原理、消火方法等について調査した。

資料1.1.2に示すように、従来、石炭運搬船においてホールド内の石炭が自然発熱または発火した事例も少なくはないことから、石炭焚き船においても自然発火を防止するための何らかの処置が必要であると考えられる。

本調査結果を総括すると次のようなことが云える。

まず、石炭焚き船用の石炭としては、できるだけ石炭化度の高いもの、破碎性の低いもの、余り乾燥していないものの、また粉炭率・低いものが望ましい。このことに関連し、石炭焚き船用の燃料として使用が推定される国内及び外国の石炭数種について、酸化速度その他の自然発火性の測定実験及び中規模の自然発火実験を昭和57年度に実施する計画である。

石炭の酸化は、石炭の温度上昇とともに急激に進展するので、船への積込み時の石炭温度、さらにはコールパンカ内の石炭温度をできるだけ低く抑えることが望ましい。このため、石炭の許容上限温度（炭種によってその値は変化するであろうが、例えば35℃）を設定し、常にパンカ内の石炭温度を計測監視して、もし温度が許容値以上に上るようなときには、散水その他の適切な処置を施すようにするのが望ましい。

パンカ等の石炭の温度計測にはサーミスタ等の小型センサーの使用が考えられるが、パンカ内のどの位置にどのような形で取付けるかは今後十分検討する必要があろう。また、できうれば、パンカ内のガス、特に一酸化炭素、酸素、メタンガス等を定時的にサンプリングし、分析することが望ましい。

石炭焚き船の石炭自然発火防止のための一方法として、ボイラ排気ガスのパンカ内への導入が考えられる。この方法は既にオイルタンカー等で利用されており、技術的にはそれ程問題はないと思われるが、重油と石炭という燃料の違い、またボイラの燃焼方式の違い等によって、燃焼排気ガスの組成や温度の違いが考えられるので、その適用に当っては、今後十分な検討が必要であろう。

上述の方法を実施すれば、パンカ内の石炭自然発火はかなりの程度防げると思われるが、なおかつ自然発火が発生した場合の消火方法としては、パンカ上部からの直接散水、またはハロンその他の不活性ガスのパンカ内への注入等が考えられ、そのような設備の取付けが望ましい。

資料 1. 1. 1 日本炭、外国炭の元素分析、工業分析

		元素分析 (d.a.t) %						工業分析 %			燃耗比 kcal/kg	發熱量 kcal/kg	備考
		C	H	O	N	S	水分	灰分	揮發分	固定炭素			
日本	三池炭	8.45	6.1	7.1	1.2	1.1	1.7	3.6	42.7	52.0	1.22	8,150	
	太平洋炭	7.78	6.0	14.9	1.1	0.2	5.5	5.0	48.2	41.3	0.86	7,120	
オーストラリア	Warkworth	8.34	5.2	9.3	1.6	0.5	2.8	12.4	33.0	51.8	1.57	7,200	Various M. Warkworth Mining Ltd.
	Birds' Rock	8.14	4.6	11.7	1.9	0.4	7.5	8.2	27.6	56.7	2.05	6,500	Rig M. Blair Athol Coal Co.
南アフリカ	Witbank	8.38	5.1	8.2	1.9	1.0	2.5	16.0	23.5	57.0	2.43	6,400	NSW州M.J.・太平洋炭鉱
	Fernelio	8.10	5.0	11.1	1.9	1.0	3.0	16.0	28.5	52.5	1.84	6,700	M. 2 M. 中心
オランダ	Mercoat						0.2	8.2	7.1	35.1	4.98	1.42	6,280
	Coal Valley	7.79	5.0	15.8	1.0	0.3	8.0	10.5	34.2	47.3	1.38	6,170	Vaal Dor M. Manalta Coal Ltd.
米国	Sufco	7.86	5.2	14.3	1.3	0.6	9.5	9.5	36.0	45.0	1.25	6,200	Upper Hiawatha M. Southern Utah Fuel Co.
	Sunnyside						1.3	4.5	5.8	38.5	51.2	2.38	7,700
中国	Beatrice	8.96	4.3	4.0	1.6	0.5	2.9	5.0	21.5	73.4	3.41	8,200	Pocahontas M. 3 Island Creek Coal Co.
	大同	8.46	4.9	8.7	0.9	0.4	3.9	5.1	32.7	58.3	1.78	7,224	保留坑
	准北	6.81	4.1	5.9	1.2	0.2	2.0	20.1	24.9	53.0	2.13	6,390	

## 資料 1.1.2 石炭運搬船の自然発火事故例

国内炭または外国炭を運ぶ石炭運搬船内で、輸送中の石炭が自然発火した事故例は可なりの数にのぼるものと推定される。例えば昭和33年だけでも7月20日にD丸、9月11日にF丸（何れも秦皇炭）で自然発火事故が起きている（日本船主協会船舶通報資料113、昭和34年1月10日）。

ここでは、オーストラリアからの石炭を輸送中のM丸内で起きた自然発火事故例について、その経過及び発生の推定原因等を紹介する。

M丸はオーストラリヤのC炭（中塊 $1\frac{1}{4}'' \sim 5''$ ）720トンを昭和45年2月17日にB港で積荷し、F港で約10日間停泊したのち出航、3月6日シンガポールに寄港、3月14日四日市に入港し、3日間停泊ののち3月18日に横浜に入港して石炭を陸揚げした。陸揚げ時に船長が確認したところによると、石炭を積んだコンパートメントは煙が充満し、図1に示すように、積荷の上部に直径約4.8m、深さ0.6mのクレータ状の沈下がみられ、このクレータの下の船底部の底板が焦げていて、自然発火が発生していたことを明らかに示していた。

C炭は、次のような工業分析値をもち、含有水分値から云うと褐炭に近い亜炭と見られるが、揮発分や灰分から云うと瀝青炭に近い褐炭と見られ、また強度的に脆い石炭と云われる。それまでに既に6回日本に輸送しており、そのうちで1回だけ64℃に温度上昇したことがあったという。また本件の後、昭和46年3月にもN丸での輸送中に75℃まで発熱し、陸揚げ後、ストックバイル中に発火している。このようなことから、このC炭は可なり自然発火し易い石炭であったと云える。

### C炭の工業分析値

	豪州政府化学試験所調査	日本の商社による調査
水 分 (%)	25.92	19.81
灰 分 (%)	2.66	2.07
揮 発 分 (%)	28.00	32.93
固定炭素 (%)	43.40	45.19
硫 黄 分 (%)	0.5～0.6	—

M丸によるC炭輸送については、船積み前（1月12日）に本社より船長に注意事項が伝達されており、積荷の表面をポリシートで覆い、倉内諸開口部を完全密閉すること、検温パイプを船底付近まで4本挿入し、1日2回8時と16時に検温及びガス測定を行うこと、ガス濃度が1.5%以上検知されたときはベンチレーションを行うこと、発熱、発火の危険が増大した場合には、部分的散水または全面注水等を行うが、具体的な処置については事前に本社に連絡すること等が指示されていた。

上記の4本の検温パイプA、B、C、Dの位置、及びガス測定孔3LTD及び3LHの位置を図1に示す。船では積込時から毎日8時と16時の2回、検温パイプA、B、C、Dの点の石炭温度、3LH（第3下部ホールド）内の気温、外気及び海水の温度を規定した。図2はそれら測定結果の一部を示す。なお、M丸への石炭積込時の石炭の温度は、外気及び海水温度が18℃と低かったにもかかわらず、33℃という高い温度であった。

最初、3LH内の気温は外気温度の上昇と平行的に上昇して行ったが、8日頃からは外気温度が下っても徐々に上昇し続けた。一方、石炭温度は、シンガポール寄港時の3月6日（17日目）頃までにじわじわと上昇して、A～Dの4点とも3.7～4.2℃に達していた。3月8日（19日目）にメタン検知器が0.6%メタンを示し、警報がなったので、ガス排除のために約19時間の通風を実施したが、ガス濃度は低下せず、逆に4.5%まで上昇した。3LH内の気温は、通風時には若干低下したもの、通風を停めると約6.0℃に上昇し、その後、50℃前後を上下動した。

3月11日、3LH内の気温が最高6.8℃に達したので、船長は消火のための炭酸ガス注入とガス排除の

ための通風を3月14日の四日市入港まで交互に実施した。四日市港停泊中の3月16日には、B点の石炭温度が9.0°Cに、翌日には9.7°Cに達し、横浜入港時には船倉は煙が充満していた。横浜港では、約6時間30分に亘って直接注水を行い、ようやく消火することができた。

この自然発火事故の発生原因は、一つはメタン濃度が0.6%となり警報が出たために通気を実施したことである。図1に示すように、石炭は船倉包板(Spar Sheathing)の上に積荷されているが、船倉包板と船底及び側壁の間には約2.2cmの空間があるため、積荷上部をポリシートで覆っていても、若干の空気が石炭中を流れ、発火に必要な酸素を供給したものと考えられる。第2には、陸上に貯炭されていた石炭の温度が33°Cと高かったことである。温度が高ければ、当然、水分も蒸発して、かなり乾燥しており、自然発火し易い状態にあったと考えられる。そして船倉に積込まれた高温の石炭の周囲の空気が温まり、それよりは低温の外気との温度差によって自然通気力が発生し、上述の船倉包板と船底の空間から空気が石炭中を上昇したものと推測される。第3には、石炭の検温箇所4点が何れも船倉の隅に配置されていたため、自然発火の起きた中央底部の石炭温度上昇を早期に発見できなかったことである。

事故後、今後の対策として、特に夏期においては、積込時の石炭温度に注意し、温度が高いときには貯炭の上部から散水するか、またはコンベヤで積込中の石炭に散水すべきであること、船倉包板と船側との隙間を完全にブロックするか、または包板上にポリシート等を敷いてから、その上に石炭を積込むべきであること、検温位置を十分に検討すべきこと等が指摘された。

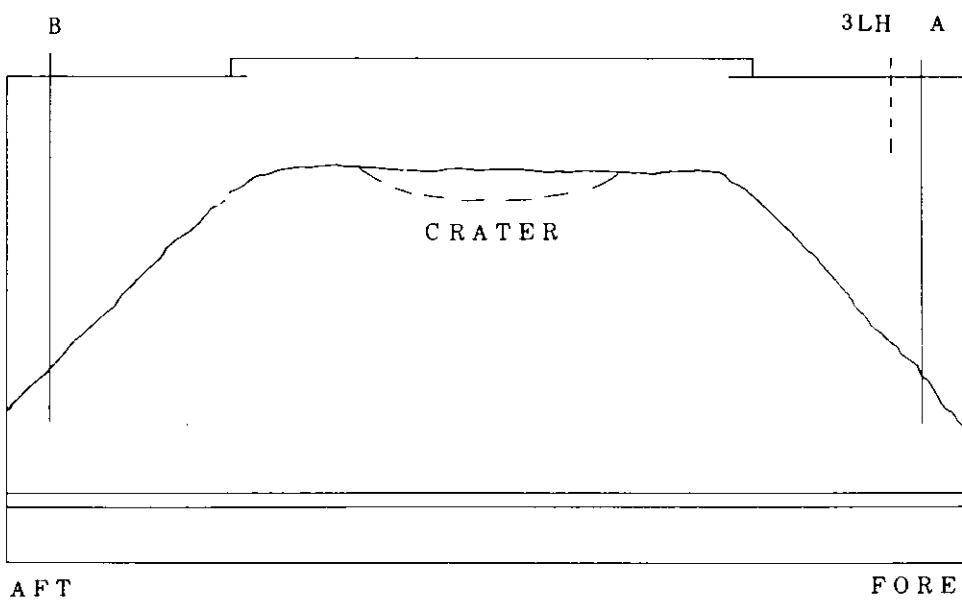
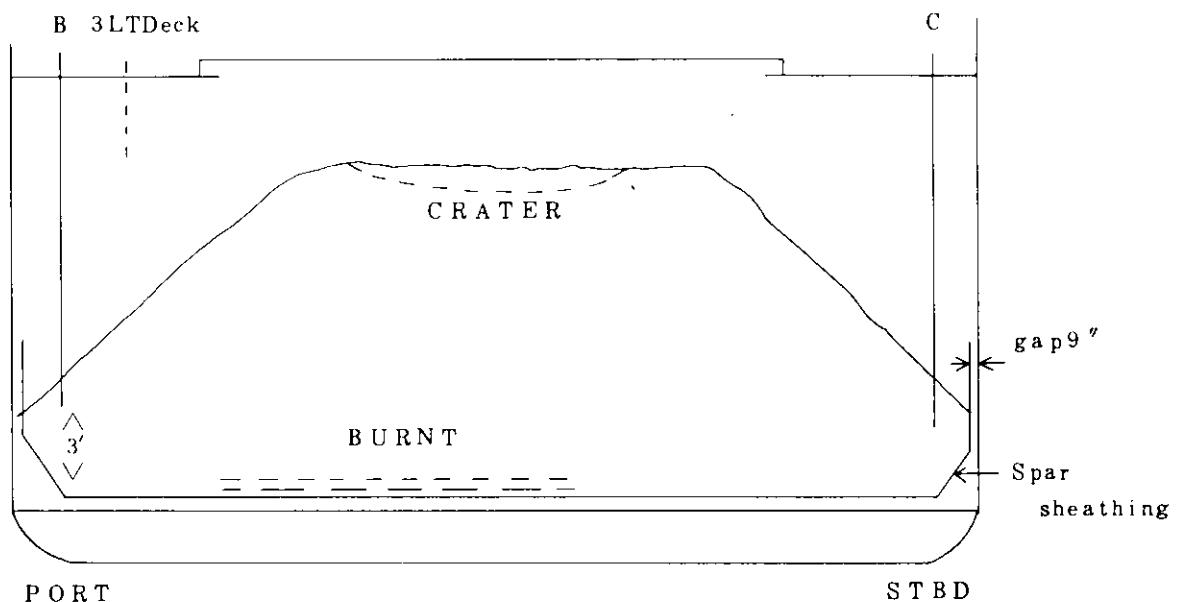
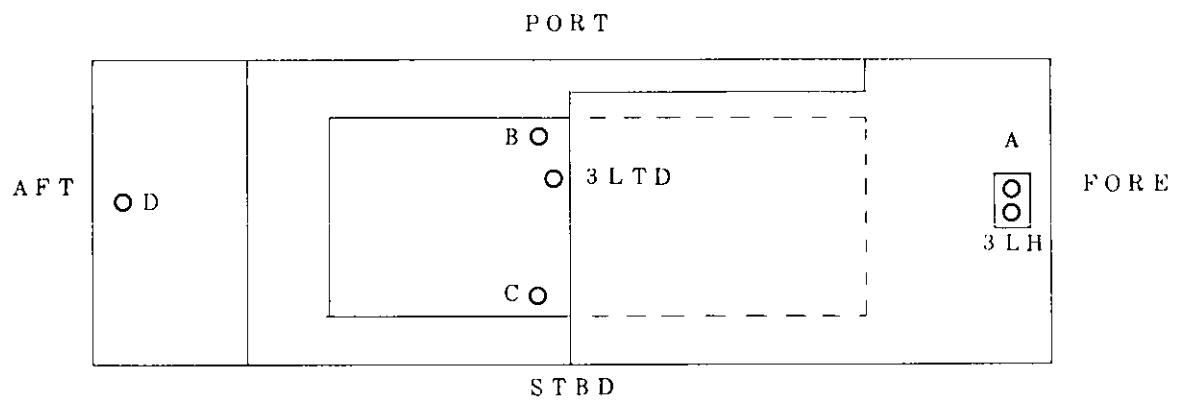


図1. M丸の石炭積荷船艤及び温度・ガス測定個所

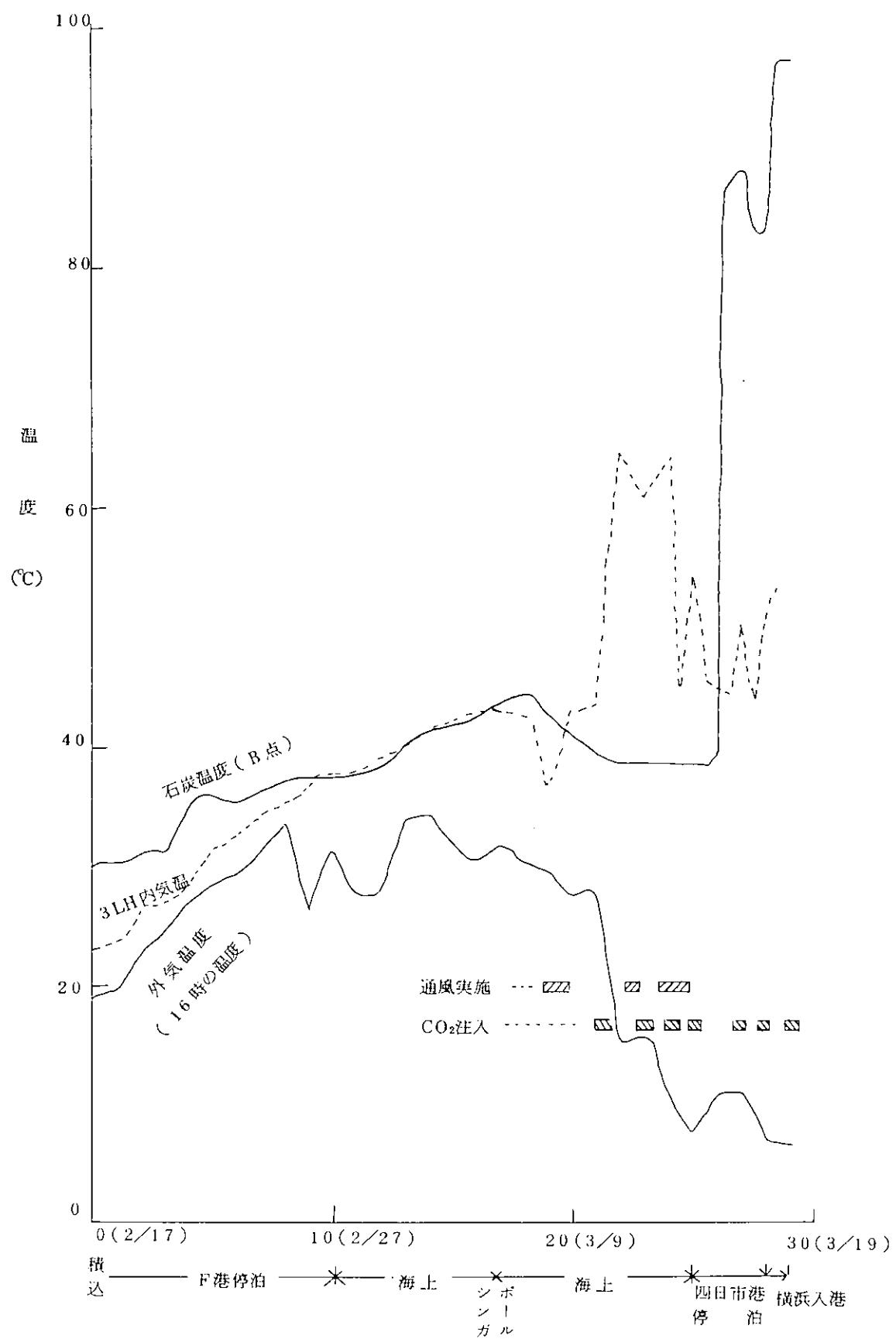


図 2 温度測定結果の推移

## 第2章 石炭のガス・炭じん爆発防止のための基礎調査

### まえがき

ガス・炭じん爆発は炭鉱における重大災害の一つであり、我が国で炭鉱災害統計がとられるようになつた明治38年(1905)以来昭和55年(1980)末までに2229回の炭鉱爆発が発生している。<sup>1)2)</sup>

炭鉱爆発には、炭層または採掘炭から発生し坑内に停滞したメタンに何らかの着火源によって着火して発生するガス爆発、およびこのようなガス爆発に誘発されまたは直接に何らかの着火源により着火して発生する炭じん爆発がある。炭鉱爆発の多くは単純なガス爆発であり、次いでガス爆発から誘発された炭じん爆発であり、純粹の炭じん爆発は極めて希れである。

我が国では明治時代から大正初期にかけての炭鉱爆発は、メタンの着火によるガス爆発から炭じんが誘爆する、いわゆる典型的なガス炭じん爆発が多かったが、大正4年(1915)に石炭坑爆発取締規則が制定され、炭じん爆発防止のため散水または防爆岩粉の散布が強制的に行われるようになってから、次第に大規模な炭じん爆発は少なくなった。

炭鉱におけるガス・炭じん爆発は、石炭採掘に伴って発生するものであるから、年出炭100万t当たりの爆発回数の推移は、石炭取扱いに関する爆発の危険度ないし防爆保安技術の推移を示すものと言えよう。1910年代から最近に至るまでの我が国の炭鉱における年出炭100万t当たり爆発回数の年別推移をみると図1.2.1のようである。1920年代まで1以上であったものが、1960年代から0.5以下となり、1970年代から0.2以下で1980年代は0.1以下になると期待されている。

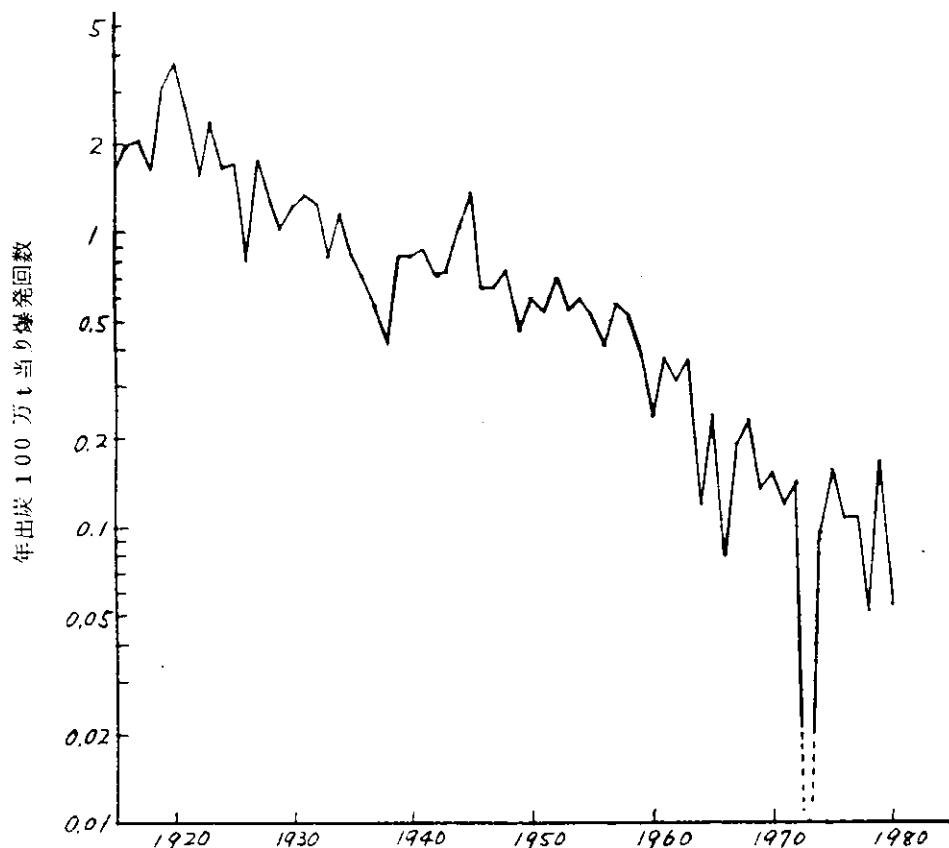


図1.2.1 年出炭 100 万 t 当り爆発回数の年別推移

炭鉱におけるガス・炭じん爆発が減少したことは、防爆保安技術の進歩に負うところが多いことは言うまでもないが、鉱山保安管理機構が整備充実され、安全に関する管理チェックが徹底するようになったことも預かって力があるものと考えられる。

燃料として石炭を使用する船舶ないし石炭輸送船は、多量の石炭を取扱うのでそれによるガス・炭じん爆発の危険性が潜在するおそれがある。したがってかかる船舶の建造計画に当っては石炭に起因するガス・炭じん爆発防止に関する配慮が必要である。最近の炭鉱爆発の発生推移をみると、炭鉱のように好ましくない諸条件に制約されている環境でさえ、保安計測と制御システムの発達によって100万t当たりの爆発回数は既に0.1を達成し、0.01達成も夢ではなくなっている。まして環境条件を制御しやすく、計装システムの設置の容易な船舶内では石炭に起因するガス・炭じん爆発を絶無ならしめることは決してむづかしいことではない。それにはまず石炭に起因するガス・炭じんの爆発性に関する基礎的事項について一通りの検討を行っておく必要があろう。

今回、石炭焚き船におけるガス・炭じん爆発の防止についての調査研究が日本鉱業会に委託されたので、ガス・炭じん爆発に関する研究者による検討委員会を設け、炭鉱および工場関係の内外の文献ならびに知見に基づいて、石炭焚き船のガス・炭じん爆発防止への適用を考慮して本章を執筆した。

#### 日本鉱業会 ガス・炭じん爆発に関する調査委員会

岩崎 孝	早稲田大学理工学部資源工学科
榎本 兵治	東北大学工学部資源工学科
小田 仁平治	石炭技術研究所
後藤 研	九州大学生産科学研究所
島田 庄平	東京大学工学部資源開発工学科
中島 嶽	北海道大学工学部資源開発工学科
東 猛	公害資源研究所資源第4部
房村 信雄	早稲田大学理工学部資源工学科
土居 晃和	日本鋼管株式会社船舶計画部

#### 参考文献

- 1) 資源庁鉱山保安局：炭鉱爆発(1951)
- 2) 通産省立地公害局：鉱山保安年報(各年度版)

#### 1. 可燃性ガスの発生と爆発性

##### 1.1 石炭からの可燃性ガスの発生

###### 1.1.1 可燃性ガスの発生

石炭が包蔵している可燃性ガスは、主として炭化水素系ガスであって、それもほとんどメタンと考えてよい。表1.2.1に、炭鉱坑内の湧出ガスの組成を参考までに掲げる。

表 1.2.1 炭鉱における坑道通気の炭化水素組成分析例

炭 鉱 名 名 号	番 号	個 所	ガス成分 (P.P.M.)									
			CH <sub>4</sub> ×10	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	iso-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	iso-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
A	1	入気坑口	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	入気分歧点	33.0	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	入気側片盤坑道	38.2	0.17	—	—	—	—	—	—	—	—
	4	a層払中央部	55.1	0.34	0.07	0.12	tr<0.02	—	—	—	—	—
	5	排気側肩風道	31.1	5.2	0.44	1.5	0.02	0.85	0.36	—	—	—
	6	排気合流点	17.6	3.0	0.33	0.74	0.06	0.48	0.16	—	—	—
	7	総排気	20.1	1.8	0.20	0.47	0.03	0.36	0.14	—	—	—

炭層に存在するメタンガスは、石炭の生成時に発生したもので、石炭生成を段階的にみてみると、

- 第1段階 植物の腐敗、泥炭化
- 第2段階 泥炭、亜炭、褐炭化
- 第3段階 鐘青炭化
- 第4段階 無煙炭化

といった過程を経ているが、第1から第2段階にかけて発生したメタンは大部分が消失してしまい、第2から第3段階にかけて発生したメタンが現在、炭層中に包蔵されている炭層ガスとしてのメタンである。第4段階に進むと脱メタン作用が働き、次第にメタン量は減少する。一説によれば、セルロース1tから242m<sup>3</sup>のメタンが生ずるといわれている。現在の炭層ガスの多寡は、地質構造、深度、被覆岩石などに大きく影響される。

さて、地山炭層中のメタンガス量は、ガスの多い炭層では10~90m<sup>3</sup>/tとされている。石炭の孔隙率はたかだか10%以下であるので、これだけの包蔵ガス量は孔隙内の被圧ガス（自由ガスと呼ばれる）では説明できず、大部分は吸着ガスである。メタンの石炭への吸着は、物理吸着と考えられており、そのモデルとして表面への単層吸着、すなわち石炭の表面にメタン分子が1個吸着するだけで、メタン分子の累層（多層吸着）は形成されないと考えられている。石炭の内部表面積は、吸着試験により測定されるものであるが、20~90m<sup>2</sup>/gという大きな数字が得られており、特に孔径が10~100Å以下のミクロ孔隙が多いためだといわれている。<sup>\*</sup> 図1.2.2に内部孔隙径分布の一例を示す。

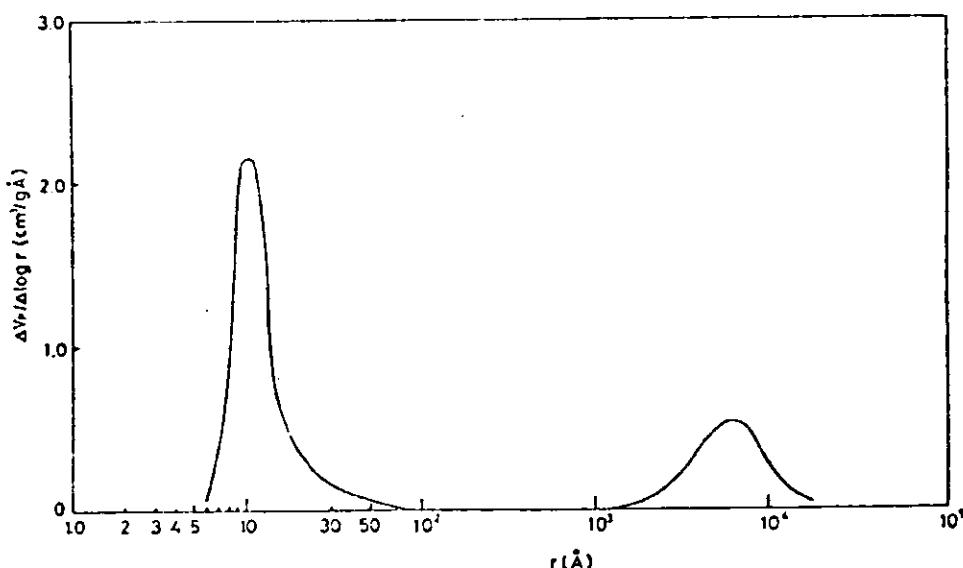


図 1.2.2 石炭の内部孔隙分布図

\* メタン分子の大きさは4Å (10<sup>-8</sup> cm) である。

さて、吸着量はメタンガス圧、温度などによって変るが、特にガス圧の上昇に応じて増加し、一般に両者の関係は、Langmuir の式

$$Q = \frac{ab p}{1 + ap} \quad \dots \dots \dots \quad (1.2.1)$$

で表わされる。ここに

$Q$  : ガス圧  $p$  における吸着ガス量

$a, b$  : 吸着ガスの性質、温度、吸着媒の性質により決る定数

また近似的には、

$$\frac{w}{w_N} = \left( \frac{p}{p_N} \right)^\alpha \quad \dots \dots \dots \quad (1.2.2)$$

ここで  $w_N$  : 大気圧  $p_N$  における吸着ガス量

$w$  : ガス圧  $p$  における吸着ガス量

$\alpha$  : 吸着定数 ( $0.4 \sim 0.85$ )

でも表わされる。

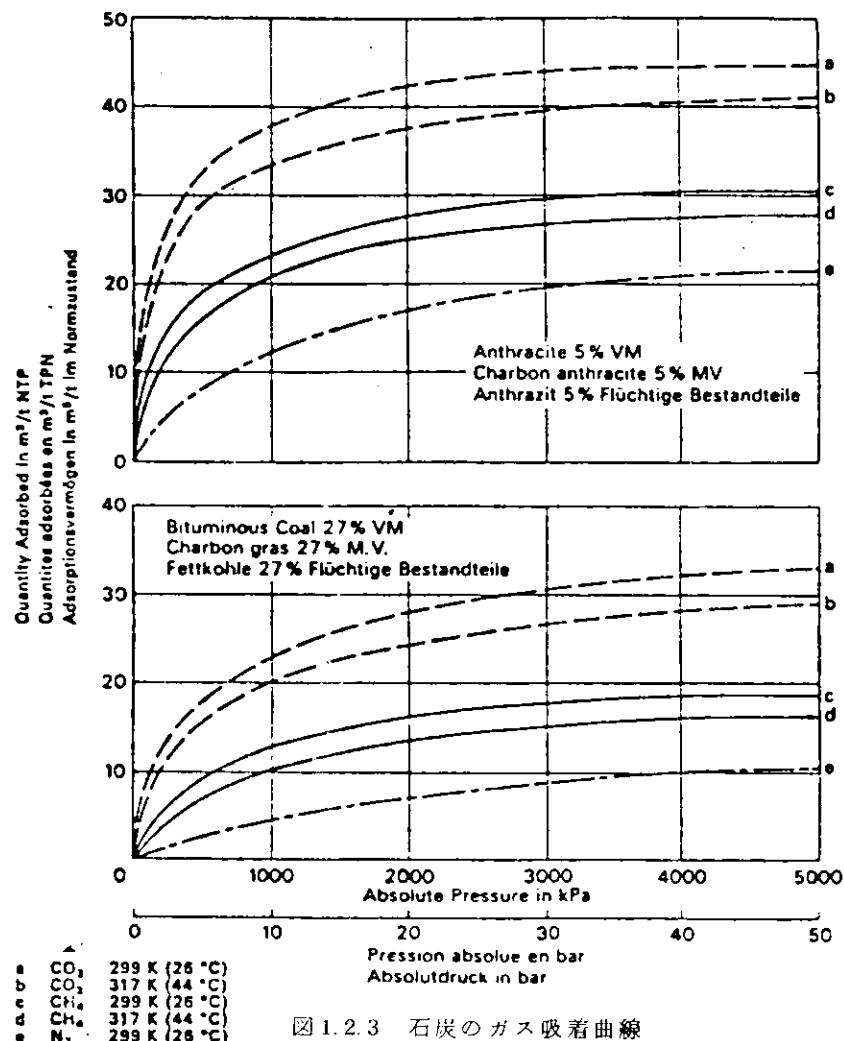


図 1.2.3 石炭のガス吸着曲線

図 1.2.3 にて、ガス圧一吸着曲線の例を示す。<sup>1)</sup> この図からわかるように、 $1.0 \sim 2.0 \text{ m}^3/\text{t}$  の吸着ガス量は、ガス圧  $1.0 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$  の場合に得られるのであって、したがって石炭が常圧下にさらされると常圧に見合った吸着ガス量に均衡するので、石炭内部からガスが湧出していくことになる。さらに時間が経過すると、濃度差によるガス拡散が生じる。

### 1.1.2 船舶における石炭からのメタン

船積された石炭塊からのガスの湧出はガス拡散の状態であって、おおむね

$$Q = A \sqrt{t} \quad \dots \quad (1.2.3)$$

$Q$  : 積算ガス湧出量

$A$  : 常数

$t$  : 経過時間

の形をとるものと予想される。これは、粉碎炭からの比較的初期のガス湧出について研究した Kissell ら(1972)<sup>2)</sup> の報告から推定したものである。しかし、船倉の密閉状態における、採掘からかなり長時間経過した石炭塊からのガス湧出については、実測する必要がある。なお、高圧吸着後に圧力解放を行って、ガス湧出速度の解析を行ったものに、Airey(1968)<sup>3)</sup> の理論的研究がある。Airey は、圧縮性流体のダルシー流れを考えて、熱問題の解を借りて近似解を提案するとともに、実験式をも提案している。

石炭は、採炭後坑外に堆積された場合でも、消費地への輸送途中でも、徐々にメタンを湧出しているが、これらの場合にはメタンは直ちに大気中に拡散し、石炭周辺で危険な濃度にまで達することはほとんどない。しかし、密閉箇所、例えばサイロ、地下トンネル、船舶のホールドなどに石炭が存在するときは、これらの石炭から湧出したメタンは、大気中への拡散が抑制され密閉空間に停滞し、時間の経過とともに爆発濃度に達する可能性がある。

現在までに石炭輸送中のメタンの爆発による事故例もかなり報告されている。これらの着火源は、電気火花、自然発火、ライターおよび喫煙等があげられている。昭和40年に船舶整備公団では石炭専用船のメタンによる爆発事故防止のため、総トン数  $2,790 \sim 4,570$  トンの石炭専用船3隻について、北海道炭を積込んだホールドについてメタンの停滞試験を行った<sup>4)</sup>。この測定結果を要約すれば次のとおりである。

- 1) 一般にホールド空間のメタン濃度は、上方部、例えばベンチレータ、マンホール等の中が最も高い。
- 2) ホールドのメタン濃度は、出船後  $3.0 \sim 4.0$  時間、一定の割合で増加する傾向がある。
- 3) ホールドの石炭内部では、積込み深さとともにメタン濃度が増し、深さ  $2 \sim 3 \text{ m}$  で爆発濃度に達する。
- 4) ベンチレータの開放によって、輸送中におけるホールド空間のメタン濃度を大幅に低下させることができる。
- 5) ベンチレータやハッチカバーを開放した場合でも、石炭中のメタン濃度は低下せず、むしろ増加する傾向を示す。
- 6) ホールドに停滞するメタン濃度は、石炭のメタン包蔵量に影響される。
- 7) ホールドのメタン濃度増加にともなって酸素濃度が減少する。

ホールドに蓄積したメタンを排除するためハッチカバーを1箇所だけ開放しても、ガスは容易に排除されず、逆に濃度の増加する部分があった。確実にメタンを排除するためには、気流が流れるように2箇所のハッチカバーを開放しなければ効果がないことが認められた。

石炭専用船のホールドにおけるメタンの停滞現象は、ホールドが密閉されていてその中の石炭に一

定期間動きがない場合のものである。しかし、石炭焚き船のコール・パンカ内では石炭は毎日消費されて一定量づつ減少して行くので、メタンがパンカ上部に停滯する状態も石炭専用船のホールドの場合とは多少異なるものと考えられる。いずれにしてもコール・パンカなど石炭の存在する場所では、メタンの停滯する可能性のある箇所のメタン濃度を常時計測し、監視していることが必要である。

パンカ底部の塊炭群の隙間には爆発下限界以上のメタンが存在している可能性があるので、パンカ底部から石炭を抽出してデリー・サービスホッパへ輸送するシステム内ではガス爆発防止対策を考慮しておく必要があろう。なお、大気圧が降下するときは、石炭からのメタン湧出が増加する傾向があるので、天候が悪化するときは特に警戒しなければならない。

## 1.2 可燃性ガスの爆発限界

メタンガスの爆発の基本的な問題は、波止の「ガス・炭じん爆発」(1966)<sup>5)</sup>に詳述されているので、主として同書から要約する。

燃焼は、一般には可燃性ガスと支燃性ガスのある範囲の混合組成の場合にのみ、その中を伝っていく。可燃性ガスの濃度が低過ぎても高過ぎても燃えない。低い方の限界を爆発下限界、高い方を爆発上限界という。この上限、下限の領域を爆発範囲と呼ぶ。

メタンの爆発限界には、1) 温度 2) 湿度 3) 気圧 4) 火源 5) 不純物の混入などが影響するが、このうち1)~4)までの因子による変化の範囲は2~3%以内だが、5)は大きな影響を与えることがある。メタン-空気混合気の爆発範囲は5~15%であるが、この範囲が上記の1)~4)の因子によってどの程度影響を受けるかを確かめた実験例を次表に示すが、大きな変動でないことが理解できよう。

表 1.2.2 各因子によるメタン爆発限界の変動

影響因子		最低爆発限界%	最高爆発限界%
ガ初 ス の温	20℃	6.4	13.7
	80℃	6.0	13.9
ガ温 ス の度	乾燥ガス	5.0	15.0
	水分飽和ガス	5.15	15.0
ガ初 ス の压	700 mmHg	5.13	13.7
	760 "	5.17	13.7
	1,060 "	5.20	13.7
点 火 热 源	電気安全灯用電球	5.0	13.0
	マッチ タンクステン線 (直径 0.06 mm)	4.9	14.35
	衝撃電圧 25 kV の 花火	5.0	15.00
		4.8	13.25

メタンに他の可燃性ガスが混入した場合の爆発限界については、例えば柳生<sup>6)</sup>の研究があるが、ル・シャテリエの式

$$L = \frac{a + b + c + \dots}{\frac{a}{A} + \frac{b}{B} + \frac{c}{C} + \dots} \quad (1.2.4)$$

ここで、 $L$ ：爆発限界

$a, b, c, \dots$ ：各ガスの容積比(%)

$A, B, C, \dots$ ：各ガスの爆発限界(%)

が実用性があるとされている。<sup>5)</sup>ただし、可燃性ガス成分の和  $a + b + c + \dots = 100$  と  $L, A, B, C, \dots$  を各ガスの爆発下限界とすれば、 $L$  は混合ガスの爆発下限界を示し、 $A, B, C, \dots$  を各ガスの爆発上限界とすれば、 $L$  は混合ガスの爆発上限界を示す。実測の結果によれば、上限界値には良い一致をしない。しかし石炭からの湧出ガスのみの場合は、ほとんどメタンのみと考えてよいので、可燃性ガス混入による爆発限界の変動については考慮する必要はない。

### 1.3 可燃性ガスの爆発現象

爆発は、燃焼が高速度で行われ、その結果高温による熱膨張が急激に起って高圧を生じ、周囲に振動が伝わるもので、これが周囲に向って伝ばしていく。発生した高圧で近接の未燃ガスの断熱圧縮が生じると、伝ば速度は秒速 2,500 m/s にも達する。

爆発圧力は、ガス濃度、容器容量などによって異なるが、標準気圧のもとでは理論的には、ガスの初温を 20°C とすると、約 7.4 kg/cm<sup>2</sup> となる。実際には熱損失のためこれより小さい。メタン濃度の 9.5% のときが完全燃焼することになるので、爆発圧力は最大となる。

爆発炎の温度は、理論的には 2,000°C であるが、実際には 1,800~1,900°C になるといわれている。

メタンガス爆発の跡ガスの一例を表 1.2.3 に示す。<sup>5)</sup> 爆発直後には酸素はほとんど消費されてしまっているが、救護隊が到着する頃には戻り現象によって新鮮空気が補充されるため多少の酸素が存在するようになるが、一酸化炭素は 0.2~1.5% も存在し素面で呼吸するものは極めて危険である。

表 1.2.3 ガス爆発の跡ガス組成例

ガスの種類	爆発前(%)	爆発後(%)
メタノン(CH <sub>4</sub> )	12.5	0.38
酸素(O <sub>2</sub> )	18.13	0
窒素(N <sub>2</sub> )	69.37	79.09
炭酸ガス(CO <sub>2</sub> )		6.09
一酸化炭素(CO)		7.74
水素(H <sub>2</sub> )		6.70

### 1.4 可燃性ガスの検知

可燃性ガスは、ガスクロマトグラフによって、種類と濃度を知ることができる。石炭からの通常の湧出ガスは、主成分がメタンであるので、メタンの検知法について述べる。

現在、実用機器に利用されているものには、表 1.2.4 のような 5 種類がある。<sup>7)</sup> 連続監視の点からみると、サーミスタタイプの熱伝導度法と赤外線吸収法が適しているものと考えられ、炭鉱における実績

もある。

炭鉱における生産、保安の中央監視制御システムの開発は昭和40年代の初頃から始められ、44年秋から実用化され、その後現場経験の蓄積とともに改善普及し<sup>8)</sup> 現在ではすべての主要炭鉱で中央監視制御システムを備えている。これらのうち、メタンの検知には、本質安全防爆型のサーミスタ素子を用いた熱伝導法とポンプ吸引による赤外線吸収法とで、0～3%，0～5%および0～100%の検知範囲のものが用いられている。そのほか、一酸化炭素、温度、風速、風量なども計測されている。

船舶における石炭からのメタンの検知には、コール・パンカおよびディリーサービスホッパの内部の天井部に、熱伝導型のセンサーを設置し、計測部は直接監視盤に接続するか、距離があれば信号搬送によって監視盤に送信すればよい。なお、計測部は外気雰囲気に設置できるならば、防爆型である必要はない。熱伝導型は、長期間の使用および必要精度の点で、坑内での使用実績から最適と考えられる。

表1.2.4 可燃性ガス検知法の種類と特性

測定法	測定原理	おもな特徴		備考
		利点	欠点	
接触燃焼法	熱線の接触燃焼による温度変化	1. 低濃度のガスに対し検知感度が大 2. 他の不燃性ガスの影響が小 3. CO <sub>2</sub> の影響が小	1. 湿度の影響がある 2. 高濃度のガスは測定できない	多数製品化されて実用化されている
光波干渉計法	光の屈折率の差による干渉じまの移動	1. 精度が高く、小型で較正が容易 2. 低濃度より高濃度まで測定可能	1. 気圧の影響がある 2. ガスの選択性がない	携帯形として最も多く使用されているが光電変換して電流計に指示させるものも実用化されている。
熱伝導度法	熱伝導度の差による熱線の温度変化	1. 精度が高く、安定性に富む 2. 低濃度より高濃度まで測定可能	1. 低濃度の検知感度が小 2. CO <sub>2</sub> 、温度、湿度の影響あり 3. ガスの選択性がない	最近サーミスタ素子を用いたものが多く実用化されている
赤外線吸収法	赤外線の吸収能の差による温度または圧力の変化	1. ガスの選択性あり、防害ガスの影響がない 2. 精度が非常に高い 3. 低濃度より高濃度まで測定可能	1. 装置が複雑で大型化している 2. 防じん、防湿に注意 3. 価格が高い	欧州諸国で最も可燃性ガス検知警報器に使用されている
半導体法	金属酸化物半導体にガス分子が吸着したときの電気伝導度の変化	1. 検知感度が大 2. 検知素子が低成本	1. 検知素子の安定性が不十分 2. 温度、湿度の影響がある 3. ガスの選択性がない	簡易ガス漏れ検知警報器に多く使用されているがまだ改良の要があり

## 引　　用　　文　　獻

- 1) CEC : Firedamp Drainage Verag Glückauf (1980)
- 2) Kissell, F.N. and Bielicki, R.J.: An IN-Situ Diffusion Parameter for the Pittsburgh Pocahontas No. 3 Coalbeds  
Bureau of Mines Report of Investigation 7668, (1972)
- 3) Airey, E.M.: Gas Emission from Broken Coal. An Experimental and Theoretical Investigation  
Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 5, pp. 475--494, (1968)
- 4) 菅野昭雄：石炭の海上輸送におけるメタンの発生 採鉱と保安 Vol. 13, No. 12 (1967)
- 5) 波止薫：ガス・炭じん爆発 鉱業労働災害防止協会 (1966)
- 6) 柳生昭三：混合ガスの爆発範囲  
安全工学 Vol. 1 (1962) No. 1~Vol. 8 (1969) No. 3
- 7) 正田強：火災・爆発危険性の測定法  
日刊工業新聞社 (1977)
- 8) 吉田俊郎：炭鉱における生産、保安の中央監視制御システムの開発 日本鉱業会誌 Vol. 89, No. 1025, P. 443 (1973)

## 2. 炭じんの発生と爆発性

### 2.1 炭じんの発生

石炭の微細な粉末、すなわち炭じんあるいは微粉炭が空気中に適量分散浮遊し、炭じん雲を形成した場合に爆発性を有する炭じんを爆発性炭じんと言い、石炭鉱山保安規則では工業分析による揮発分値が11%以上で、かつ20 mesh(0.84mm)以下の粒度のものと規定されている。しかし、これは行政上の規定であって、例えば揮発分値が11%以下の炭じんでも極めて強力な着火源を用いれば爆発を発生し<sup>1)</sup>、また揮発分値が20%以上の炭じんでも弱い着火源では爆発を発生しない。一般的に言えば、上記の保安規則の規定は危険炭じん評価の目安としてほぼ妥当なものであり、諸外国でもわが国とほぼ同様の規定を行っている。したがって全世界で生産される石炭のうちごく一部の無煙炭を除きほとんどすべての石炭が微粉となった場合に爆発性を有すると考えるべきであろう。

### 2.2 炭じんの爆発限界

上記の爆発性炭じんが実際に爆発を生ずるためには空気中に適量分散浮遊することが必要であり、爆発を生ずる炭じん雲濃度には最高限界(爆発上限界)と最低限界(爆発下限界)とが存在する。これらの爆発限界濃度は炭じんの組成や粒度によって変化し、また実験装置などによっても測定値にかなりの差異が生ずる。

炭じん雲の爆発下限界濃度に関しては多くの実験的研究が行われているが、実験者により極めて広範囲の異なった値が得られている。例えばHertzberg<sup>2)</sup>の文献調査によるとビツバーグ炭(揮発分値約35%)と同程度の炭じんの爆発下限界濃度として5~310g/m<sup>3</sup><sup>3)~11)</sup>の値が報告されており、石浜<sup>12)</sup>の調査でも23~270g/m<sup>3</sup>の範囲の報告値が挙げられている。このように広範囲の異なった値が得られているのは炭じんの組成や粒度の差異のほかに実験条件設定の優劣に起因すると考えられる。十分な精度をもつ定性的並びに定量的研究は石浜<sup>11)</sup>によって初めてなされたと評価されている。<sup>13)</sup>

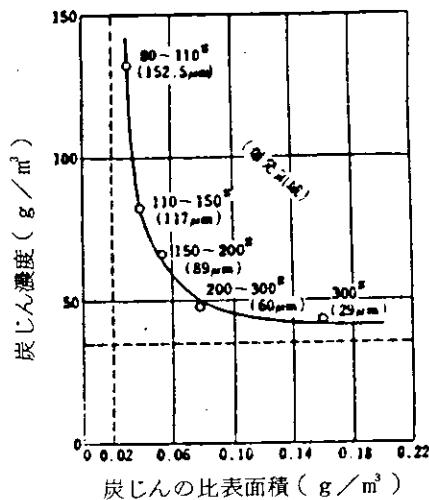


図1.2.4 炭じん雲の爆発下限界濃度に及ぼす粒径の影響(新幌内炭じんの場合)

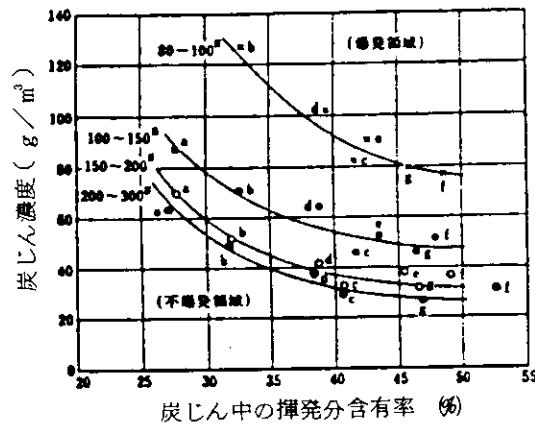


図1.2.5 炭じん雲の爆発下限界濃度に及ぼす揮発分値の影響

a : 茅沼宝徳5番層, b : 茅沼1, 2番層,  
c : 茅沼3, 4番層, d : 大夕張,  
e : 日曹天塩, f : 太平洋, g : 築別

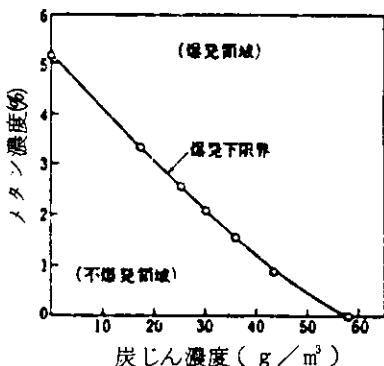


図 1.2.6 炭じん-メタン-空気混合気の爆発下限界曲線  
(--200 メッシュの新規内炭じんの場合)

図1.2.4～図1.2.6 に石浜ら<sup>14), 15)</sup>によって得られた、炭じん雲の爆発下限界濃度に及ぼす炭じんの粒径、揮発分値、および共存する可燃性ガスの影響の例を示す。炭じんの粒径が小、揮発分値が大であるほど爆発下限界濃度は低くなるが、ある限界値を越えると影響の程度は小さくなる。石浜らは実験式として、

$$C_L = 2 \times 10^{-4} dc^{2.5} + 4.43 \times 10^6 V^{-0.5} + 1.5 \quad \dots \quad (1.2.5)$$

を得た。ここに  $C_L$  は炭じん雲の爆発下限界濃度 [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]、 $dc$  は炭じんの平均粒子径 [ $\mu\text{m}$ ]、 $V$  は炭じんの揮発分値 [%] である。

また図1.2.6 に示すように可燃性ガスが共存する場合はその影響は大きく、炭じん-可燃性ガス-空気混合気の爆発下限界線は可燃性ガスの爆発下限界濃度と炭じん雲のそれを結ぶわずかに下に凸の曲線である。炭じんの灰分の影響に関して石浜ら<sup>16)</sup>は理論的考察を行ない、

$$C_L = \frac{100}{100 - As} \cdot \frac{C_{L,0}}{1 - \left( \frac{100}{100 - As} - 1 \right) \left( \frac{100}{As.m} - 1 \right) \left( 1 - \frac{C_{L,0}}{C_{st,0}} \right)} \quad (1.2.6)$$

を得た。ここに

$As$  : 炭じんの灰分値 [%]

$As.m$  : 爆発抑制最大灰分値 [%] で、爆発抑制最大岩粉混合率  $Rm$  [%] が既知ならば、

$$As.m = 57.6 - \frac{1.45 \times 10^2}{Rm - 36.15}$$

により推定される。

$C_{L,0}$  : 無灰炭じん ( $A_s = 0$ ) の爆発下限界濃度 [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

$C_{st,0}$  :  $A_s = 0$  の場合の見掛けの化学当量濃度で、およそ  $250 \text{ g}/\text{m}^3$  である。

さらに灰分の代りに岩粉が混入した炭じんについても研究されている。<sup>7)</sup>

また水分の影響に関して実験を行い、水分が数%程度以下であれば爆発下限界濃度に及ぼす水分の影響は小さいことを明らかにしている。<sup>18)</sup>

他方爆発上限界に関する研究は、下限界濃度の場合に比べて実験がさらに困難であるため極めて少ない。実験値として Price と Brown<sup>19)</sup>は  $1,650 \text{ g}/\text{m}^3$  柳本<sup>20)</sup>らは  $900 \sim 1,755 \text{ g}/\text{m}^3$  の値を報告している。また石浜ら<sup>21)</sup>は揮発分値が  $22 \sim 46\%$ 、粒径が  $4.5 \sim 127 \mu\text{m}$  の炭じんの爆発上限界濃度  $C_u$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ] の実験式として

$$Cu = 60V + \frac{6.4 \times 10^4}{dc} - 1,350 \quad \dots\dots\dots (1.2.7)$$

を得ている。

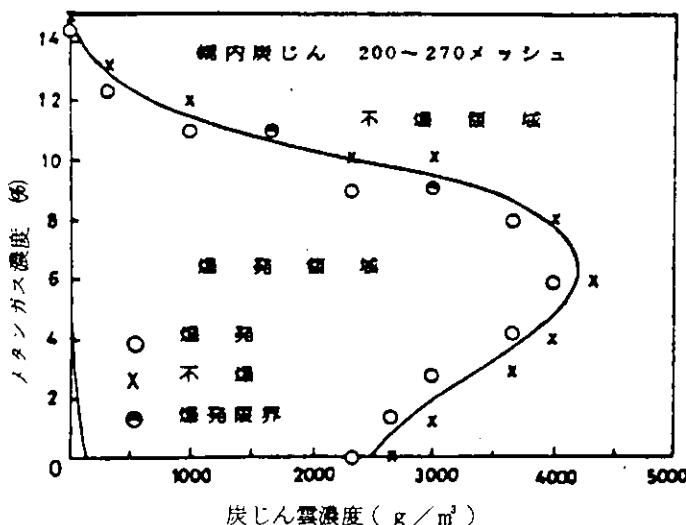


図 1.2.7 炭じん-メタンガス-空気混合気の爆発限界  
(200~270メッシュの幌内炭じんの場合)

図 1.2.7 に炭じん-メタン-空気混合気の爆発上限界線<sup>22)</sup>を示す。図より明らかのように、炭じん雲にわずかでもメタンが混入すれば、炭じん雲の爆発上限界濃度よりも高い濃度の炭じん雲でも爆発するようになる。これは極めて特異な現象であり、防爆保安上特に注意を要することである。

### 23 炭じん爆発のメカニズムと爆発現象

一端を閉じて他の一端を大気中に開放した長い管内で発生した炭じん爆発の伝ば現象は、密閉端で着火させた場合と開放端で着火させた場合とで著しい相違がある。すなわち、密閉端で着火させた場合は発生した熱により高温部の気体が膨張し、反応帯(火炎)も開放端へ向って押し出され、このため見掛けの火炎伝ば速度は真の伝ば速度より大きくなる。また火炎面の乱れにより高温度の反応帯より低温の未燃部への熱の移動速度が増し、反応速度自体も増加するため火炎の伝ば速度は1,000m/secを超えるようにもなる。<sup>23)</sup> これに対して開放端で着火させた場合は、反応熱により膨張した気体は、開放端から大気中へ放散され、火炎は1m/sec程度の速度で密閉端へ向って静かに伝ばする。<sup>24)</sup> そしてこれらの長い管内での爆発の場合、反応が終結するにつれて管壁面に熱をうばわれ、温度は低下する。したがって密閉端着火の場合、一度膨張した高温部は温度の低下により低圧部となり、火炎の伝ば速度が小の場合火炎面はこの影響を受けることもある。また爆発発生圧力は、爆発が爆轟にまで発達した場合<sup>25)</sup> 除けば、両端密閉の場合でも比較的低い値となる。

他方、球形あるいは立方体に近い形の容器の中央部で着火させた場合、火炎はほぼ同心状に伝ばし、火炎が容器壁面まで達して反応が終結した時点での容器内の温度は中央部が最も高い。<sup>26)</sup> このため爆発発生圧力は上記の長管の場合よりも高くなるが、容器内に乱れが生じなければ火炎の伝ば速度は1m/sec程度であり、容器内の圧力分布は通常無視できる。

以上述べたように、爆発が発生する空間の形態、大きさ、あるいは着火場所などの諸条件により、爆

発は様々な様相を呈すが、現在ではそれぞれの現象にはそれぞれ異なったメカニズムが相当するものと考えられている。爆発現象を爆発火炎の伝ばの観点からみると、爆発のメカニズムとしては(i)高温(燃焼)帯から未燃粒子への伝熱、(ii)炭じん粒子の着火、および(iii)着火後の燃焼の三段階を対象とすることになると考えられる。(i)については分散浮遊する炭じん粒子相互の幾何学的関係(炭じん粒子の大きさや、粒子間距離など)が問題となるが、(ii)および(iii)は単一粒子の反応機構の問題である。高温帯からの伝熱により未燃炭じんが着火するか否かの限界、すなわち爆発限界については(i)および(ii)の機構が問題となり、また炭じん粒子の反応性も重要な因子となる。このように爆発の発生および爆発火炎の伝ばには種々の要因が複雑に影響しあっており、解明されていない点も多い。現在火炎の伝ば機構として次の4つのが提唱されている。

(1) Faraday と Lyell のメカニズム<sup>27)</sup>

着火は熱分解発生ガスの気相反応によって行われ、未燃粒子への熱伝達は放射によるとしている。Essenhigh<sup>29)</sup>は、この機構による火炎の伝ば速度は数m/s程度であり、坑道内の爆炎伝ば機構とはなりえないとしている。

(2) Smoot らのメカニズム<sup>28)</sup>

炭じんは火炎の中に取り込まれて熱分解し、分解発生ガスが拡散によって酸素と合って火炎面を形成するとしている。このメカニズムな低速で伝ばする小火炎の伝ば現象を十分に説明するものと考えられている。<sup>29)</sup>

(3) Howard と Essenhigh のメカニズム<sup>30)</sup>

炭じん粒子が急速加熱を受けると、放射伝熱により炭じん表面で着火して火炎が伝ばし、着火後は熱分解発生ガスにより拡散火炎が形成されるとしている。このメカニズムによる火炎伝ば速度は1m/s程度である。

(4) Wheeler のメカニズム

Wheeler<sup>31)</sup>は、高速の伝ば火炎では炭じんは熱分解して可燃性ガスを発生する時間的余裕がないとして、固体表面での着火説を提唱した。このメカニズムは追試<sup>29),32)</sup>により次第に受け入れられつつある。

## 2.4 爆発圧力に及ぼす危険炭じんの性質と環境条件の影響

### 2.4.1 実験による考察

密閉容器内での爆発によって発生する圧力は時間とともに変化し、火炎が容器壁面に到達したあとは容器内の温度の低下とともに圧力も減少する。発生圧力一時間曲線の最大勾配を最大圧力上昇速度( $dp/dt$ )<sub>m</sub>、圧力曲線のピーク圧を、着火から圧力がピークに達するまでの時間で割った値を平均圧力上昇速度( $dp/dt$ )<sub>a</sub>といい、また圧力のピーク値を単に発生圧力Pという。図1.2.8および図1.2.9<sup>33)</sup>に発生圧力に及ぼす炭じん雲濃度、粒度ならびに炭種の影響を示す。各曲線のピーク値は、おののの場合の最大発生圧力 $P_m$ であり、このときの炭じん雲濃度は発生圧力の観点からみて最も危険な濃度であるが、爆発反応の伝ばに対して最適の状態にあるとみられるので、一般に最適濃度(Optimum dust Condition)と呼ばれている。この最適濃度は図1.2.8および図1.2.9からもわかるように、炭じんの粒度や揮発分率により変化し、およそ400~1,100g/m<sup>3</sup>の範囲にある。<sup>34)</sup>

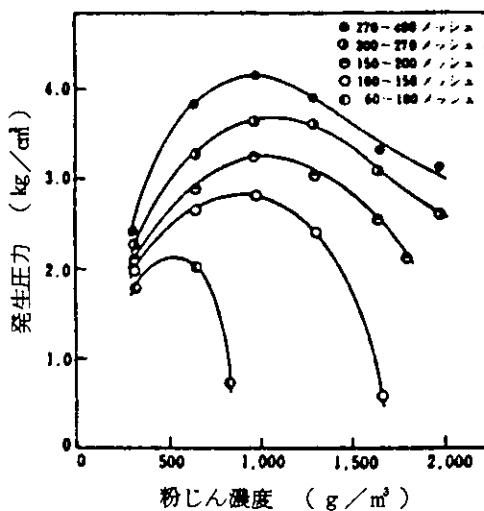


図1.2.8 炭じん爆発の発生圧力に及ぼす粒径の影響  
(奔別炭の場合)

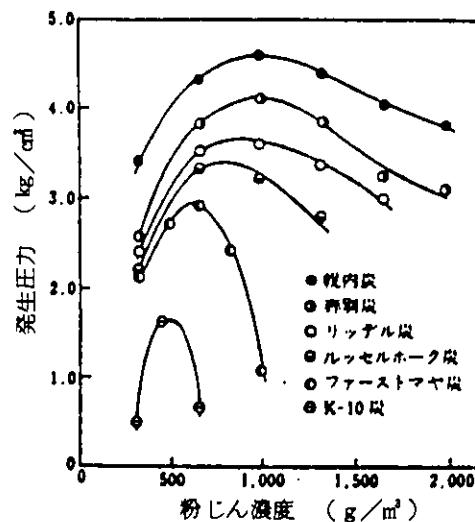


図1.2.9 炭じん爆発の発生圧力に及ぼす揮発分値  
(炭種)の影響  
(炭じん粒度: 270~400 メッシュ)

また、発生圧力は環境条件によって変化するので、最大発生圧力のうち爆発が発生する前の容器内圧力(以下初圧といいう)が大気圧で、かつ、空気中の場合の値を  $P_{m,0}$  とすると、 $V > 20\%$ ,  $dc = 4.5 \sim 12.7 \mu m$  の炭じんについて、図1.2.10に示すような関係が成り立つ。<sup>35)</sup> また、 $P_m$  に及

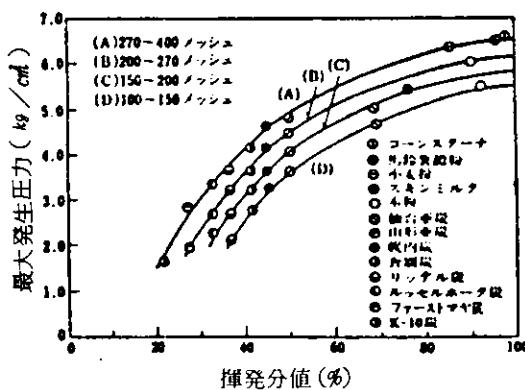


図1.2.10 最大発生圧力に及ぼす粒度および  
揮発分値の影響

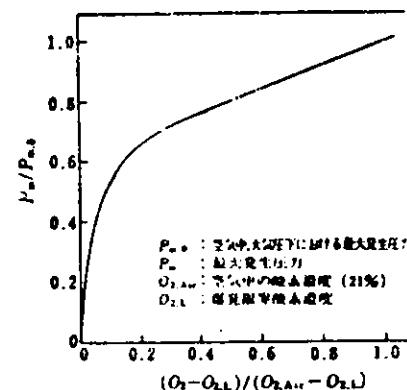


図1.2.11 酸素濃度と最大発生圧力との関係

ぼす酸素濃度の影響を図1.2.11<sup>33)</sup>に示す。さらに初圧  $P_i$  が大気圧でない場合の  $P_m$  については、  
 $0.25 \leq P_i \leq 2.1 \text{ kg/cm}^2$ において( $P_i$ は絶対圧)

$$P_m / P_{m,0} = (P_i / P_a)^{1.31} \quad \dots \quad (1.2.8)$$

が成り立つ。<sup>33)</sup> ここで  $P_a$  は大気圧(絶対圧)である。

また、最適濃度における最大圧力上昇速度を  $(dp/dt)_{m,m}$  および平均圧力上昇速度を  $(dp/dt)_{a,m}$  とすれば、これらはそれぞれ最大の値となり

$$(dp/dt)_{m,m} = 0.7 (P_m / P_i)^{2.5} \quad \dots \quad (1.2.9)$$

$$(dp/dt)_{a,m} = 0.3 (P_m / P_i)^{2.5} \quad \dots \quad (1.2.10)$$

により求められる。<sup>36)</sup>

以上述べた  $P_m$  や  $(dp/dt)m.m, (dp/dt)a.m$  などは装置を耐圧密閉構造とする場合、あるいは圧力放散設備を付設する場合などに必要な値であるが、このうち圧力上昇速度は容器の大きさによって変化するので小規模実験装置によって得られた値から次のスケールアップ法<sup>37)</sup>則によって実装置に対する値を求めなければならない。

$$(dp/dt) \cdot v^{\frac{1}{3}} = \text{一定} \dots \dots \dots \quad (1.2.11)$$

ここに  $(dp/dt)$  は最大あるいは平均圧力上昇速度、  $v$  は装置の容積である。この法則は主としてガス爆発の実験から求められたものであるが、炭じん爆発の場合にも成り立つという。田中ら<sup>38)</sup>も同様の関係を理論的に導出した。

#### 2.4.2 実規模装置の安全性評価への基礎的特性値の適用について

実験によって得られた爆発の基礎的特性値の応用を考える場合に最も重要なことは、それらの特性値が得られた“実験における爆発”と“対象としている実装置内で発生すると考えられる爆発”とが同様の形態でなければならないということである。この形態を 2 大別すると、乱流熱伝達が主とした伝熱機構である場合と、放射がそうである場合となる。前者は、空間が大きくなれば火炎面の乱れが生じやすいため大容積の装置内で、あるいは強制的に乱流を発生させている容器内などで発生しやすく、爆発が十分に発達するだけの長さや大きさがあれば爆轟となる。実規模坑道試験の結果<sup>6)</sup>によると、爆発が爆轟に転移するにはある程度の助走区間が必要で、点火源が大の場合ほど助走区間は短くなる。空気中に形成された炭じん雲について爆轟を実験的に発生させた例は數 100m の長さの実規模坑道での実験以外には見当らないが、爆轟にまで至らない場合でも乱れが大きいほど爆発も激しいものとなるようである。しかし乱れの程度と爆発の激しさとの定量的関係は明らかでない。

したがって、通常基礎的実験の対象となっている爆発とは、爆轟現象は含まず、また乱れも比較的小さい場合についてであり、火炎の伝ば速度も数 m/sec 程度以下のものである。この場合、爆発発生圧力は空間容積の大小に關係しないが圧力上昇速度は影響を受けるため、小規模実験による結果は前述のスケールアップ法則 (Cubic Law と呼ばれる) により換算する必要がある。<sup>39)</sup> 圧力上昇速度は圧力放散設備 (Vent) の設計上必要な値であり、Cubic Law は小規模実験により得られた値から実規模装置に相当する大容積の空間での値を推定するためのものである。Bartknecht<sup>40)</sup>によれば、この法則は 1,000 m<sup>3</sup> 以下の場合について実験的に確かめられたが、1,000 m<sup>3</sup> 以上の場合でも適用可能であるということである。また容器の形状については、長辺と短辺、あるいは長さと直径の比が 5 以下の場合に適用できるとされている。

輸送管内を流送中の粉じん雲の爆発に関しては、Essenhigh ら<sup>41)</sup> と松田ら<sup>42)</sup> の報告があるのみで不明な点が多いが、流速が大であるほど粉じん雲の爆発濃度範囲は狭くなり、炭じんを用いた場合の 2 インチ管内での Essenhigh らの結果では、流速が 25 m/sec 以上ではもはや爆発は生じない。これは減圧状態での空気輸送の場合についてであり、一般に圧送する場合は減圧の場合より危険性が大である。

#### 2.4.3 石炭焚船のガス・炭じん爆発発生の危険性評価

以上基礎的研究成果について述べたが、これらの成果を基本として、石炭焚船の石炭パンカーからボイラーに至るまでの石炭ハンドリングシステム内での炭じん爆発発生の危険性について考察してみる。しかし実際のシステムについて資料不足のため、以下に述べるのは一般的な検討と考えて頂きたい。

周知のように、炭じん爆発が発生するには適当な濃度の炭じん雲の形成と点火源の存在が必要である。

る。通常これらのどちらかの可能性がある場所については爆発発生危険性評価の対象とする。石炭焚船の場合、石炭パンカーからボイラーに至るまでの全ての場所に炭じん（あるいは微粉炭）が存在するものと考えられる。点火源としては、岩石や鉄片等の異物による衝撃火花、不良ペアリング等の異常加熱物、自然発火やマッチあるいはたばこなどの裸火、静電気などが考えられる。

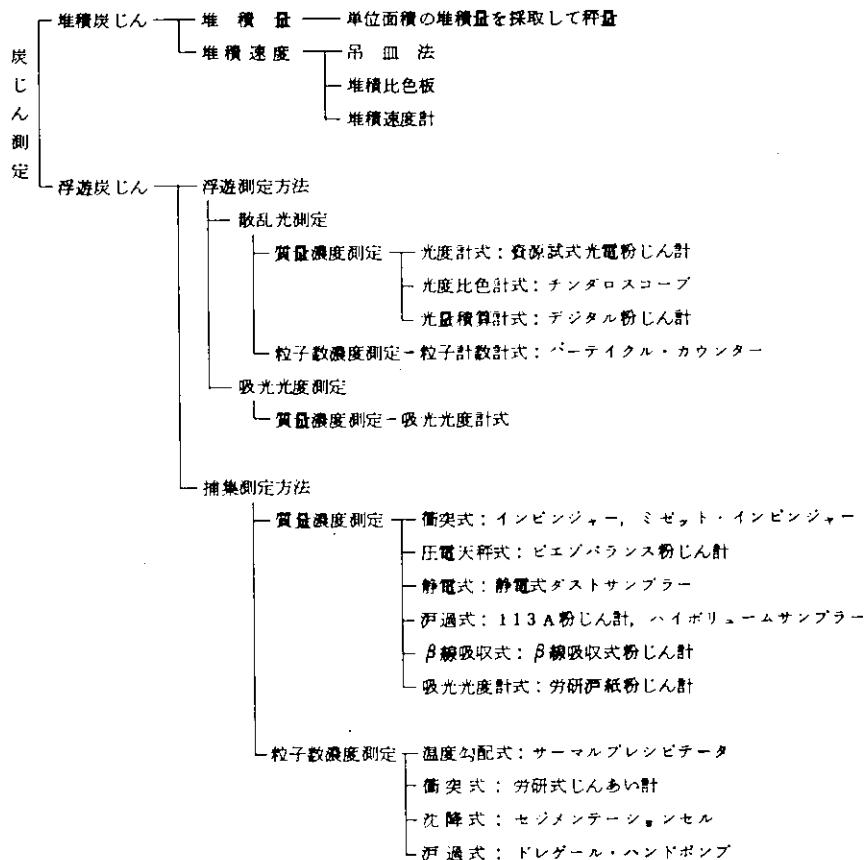
特に危険な場所として、爆発しやすい微粉の炭じんを“濃縮”する集じん装置を考えねばならない。特にバグフィルターについては除電等の対策が必要である。また空気輸送の管内は一般にそれほど危険性が大であるとは考え難いが、送圧が高い場合は爆発発生の危険性及び発生した爆発の威力とも大となるため注意を要する。通常は輸送管内よりも吐出口（ホッパー内）の方がより危険である。特に dense phase pneumatic transfer system の場合には plug 状で送られた石炭がホッパー内に放出される時管内の高圧の空気もホッパー内に開放されるものと考えられる。この場合にはホッパー内の乱れはきわめて大きなものとなるものと推察される。さらに、パンカー、ホッパーあるいはバグハウスなどでは石炭の取残しをなくさねば自然発火を発生し、炭じん爆発を誘発する可能性がある。

## 2.5 炭じんの測定

### 2.5.1 炭じん測定方法の種類

爆発性炭じんはその存在状態によって、堆積炭じんと浮遊炭じんとに分けられる。堆積炭じんとは、床面、壁面または機械設備の外部表面などにたまっている炭じんをいい、浮遊炭じんとは空間に浮んでいる炭じんをいう。これらの炭じんの主な測定方法は表 1.2.5 に示すとおりである。<sup>43)</sup>

表 1.2.5 炭じん測定方法の種類



### (1) 堆積炭じんの測定

堆積炭じん量の単位は  $\text{g}/\text{m}^2$  または  $\text{mg}/\text{m}^2$  または  $\text{mg}/\text{cm}^2$ 、堆積速度は  $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ 、 $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  ないし  $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ 、 $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$  などで表わされる。

計器による堆積炭じんの測定は余り行われていないので、測定計器も余り開発されていない。主なものとしては資源技術試験所（現在の公害資源研究所）の開発した資源試式堆積炭じん計がある。

これは炭鉱坑内で坑道などに単位時間に単位面積に堆積する炭じん量を簡単に計測する計器である。堆積炭じんの計測は一般に余り行われていないが、後述するように堆積炭じんは炭じん爆発の発生に重大な関係がある。

### (2) 浮遊炭じんの測定

浮遊炭じんの濃度を示す単位は 2 種あり、粒子数濃度では個/ $\text{cm}^3$  で表わし（アメリカでは m.p. · p.c.f 単位を用いる。 $1 \text{ mppcf} = 35.3 \text{ 個}/\text{cm}^3$ ）、質量濃度では  $\text{mg}/\text{m}^3$  で表わす。いずれの表示単位で表わすかによって計測計器が異なるか、または捕集した粉じん試料の計測方法が異なる。炭じん爆発防止の立場から浮遊炭じん濃度を測定する場合は、質量濃度による測定器を用いるべきである。

浮遊炭じんの測定には、浮遊しているまでの濃度を計測する計器と、粉じんを捕集してその質量または粒子数を計測する計器がある。前者の代表的なものには資源試式光電粉じん計とデジタル粉じん計がある。光電粉じん計は炭鉱の浮遊炭じん濃度測定用に開発されたもので、防爆型となっているので爆発性のガス、炭じんが存在する箇所でも使用できる。デジタル粉じん計は一般工場等で広く使用されているが、防爆型ではないのでガス、炭じんによる危険場所では使用できない。

捕集測定方法の多くは一般の発じん環境用であり、爆発性炭じんの計測に使用できるものは、衝突式による手動ポンプ吸引型ミゼット・インビンジャーまたは戸過式による防爆型粉じん測定器（イギリス・カセラ社 113A 型）などがある。<sup>44), 45)</sup>

### (3) 船舶における炭じんの測定

石炭焚き船におけるコール・パンカーからボイラーまでの石炭輸送システムにおいては外部へ炭じんが漏洩しないようにすることが最も大切であるが、漏洩のおそれある箇所で気中の炭じん濃度を測定するには、デジタル粉じん計などの光学的計測器を用いるのが便利である。ただし、光学的粉じん計測器は浮遊しているすべての粒子状物質を計測してしまうので、測定結果は必ずしも炭じんの濃度を示しているとは限らない。

浮遊粉じん中の炭じん分と炭じん以外の粉じん分とを区別するためには、捕集測定方法のインビンジャーまたはミゼット・インビンジャー、もしくはセルローズ戸紙を用いる戸過捕集測定器で粉じん試料を捕集し、その試料について顕微鏡法または燃焼法によって炭じん（可燃性粉じん）分と一般粉じん（不燃性粉じん）分との割合を調べる。

コール・パンカーまたはデイリー・サービス・ホッパー内部の気中炭じん濃度測定には、メタンの存在も考えられるので防爆型光電粉じん計が望ましい。空気輸送パイプ中の炭じん濃度計測には、特別の捕集測定装置を用い、円筒戸紙などに炭じんを捕集しなければならない。

## 2.5.2 堆積炭じん測定の意義

炭鉱切羽のように炭層の採掘時に多量の炭じんが発生する場所でも、空気中の浮遊炭じん濃度が爆発範囲に達していることは通常の作業状態ではありえない。高濃度発じん時でもその濃度は数  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$  程度である。これに対して床面等の堆積炭じんが何らかの衝撃などで一挙に再飛散すると、容易に爆発範囲の高濃度炭じん雲を形成する可能性がある。

例えば、床面積  $10 \text{ m}^2$ 、高さ  $2.5 \text{ m}$  の室内で、床面  $1 \text{ cm}^2$  当り  $0.1 \text{ g}$  の炭じんが均一に堆積している

ものとする。炭じんの見掛け密度を  $1 \text{ g/cm}^3$  と仮定すれば  $0.1 \text{ g/cm}^3$  の炭じん層の厚さは約  $1 \text{ mm}$  で、石炭を取扱っている場所ならば何處でも十分起りうる堆積厚さである。この堆積量は  $1 \text{ m}^2$  につき  $1,000 \text{ g}$ 、 $10 \text{ m}^2$  では  $10 \text{ kg}$  となる。この室内容積は  $25 \text{ m}^3$  であるから、 $10 \text{ kg}$  の炭じんが均一に全空間に飛散浮遊するものとすれば、その濃度は  $400 \text{ g/m}^3$  となる。

この濃度は極めて危険な濃度である。現実には堆積炭じんが相当に大きな空間内に均一に再飛散するようなことは考え難いが、再飛散の過程では  $1,000 \text{ g/m}^3$  を越える濃厚な部分から  $1 \text{ g/m}^3$  以下の稀薄な部分まであり、その中にはその場合の環境条件に応じた初期着火に最適な濃度範囲がありうるものと考えられる。このような意味で、炭じん爆発防止の上から堆積炭じんの存在に特に注意する必要がある。

### 引　用　文　献

- 1) 荒木　忍：鉱山保安ハンドブック，山田　穣編　.133 朝倉書店(1958)
- 2) Hertzberg,M. and Cashdollar,K.L.: 17th Intern. Conf. on Coal Mine Safety Research, Bulgaria (1977)  
邦訳：1977国際鉱山保安研究会議論文集，公害資源研究所編
- 3) Hartmann,I.: Ind. Eng. Chem. Vol. 40 No. 4 (1948)
- 4) Singer,J.M., Cook,E.B., and Grumer,J.: Bureau of Mines RI 6931 (1967)
- 5) Enomoto,H.: 16th Intern. Conf. on Coal Mine Safety Research, Washington,D.C., Discussion of Papers p.82 (1975)
- 6) Cybulski,W.: Coal Dust Explosions and Their Suppression, p.169 English Translation (1975)
- 7) Nagy,J. and Portman,W.M.: Bureau of Mines RI 5815 (1961)
- 8) Yu,Shen-han and Chao,Tzu-chih : Intern. Conf. of Directors of Safety in Mines Research, England (1965),　邦訳：1965国際鉱山保安研究所会議論文集
- 9) Helwig,N.: Staub-Reinhalt,Luft, Vol. 27, No. 8 (1967)
- 10) Maguire,B.A., Slack,C., and Williams,A.J.: Combustion and Flame Vol. 6, No. 4 (1962)
- 11) Ishihama,W.,: 11th Intern. Conf. of Directors of Safety in Mines Research, Poland (1961)
- 12) 石浜　涉：炭じん爆発に関する基礎的研究 学位論文（昭和36年）
- 13) Essenhigh,R.H.: Fire Research Abstracts and Reviews, Vol. 8, No. 2 (1966)
- 14) 石浜　涉, 岡田寿徳, 吉田儀一: 採鉱と保安 Vol. 10, No. 2 (1964)
- 15) 石浜　涉, 岡田寿徳, 吉田儀一: 採鉱と保安 Vol. 10, No. 3 (1964)
- 16) 石浜　涉, 梶本兵治, 盧鑑章: 日本鉱業会昭和56年度春季大会研究・業績発表講演会講演要旨集（昭和56年4月）
- 17) 石浜　涉, 梶本兵治, 水口剛文, 菅野明: 日本鉱業会昭和55年春季大会研究・業績発表講演会講演要旨集（昭和55年4月）

- 18) 石浜 渉, 横本 兵治, 盧鑑 章: 第14回安全工学研究発表会講演予稿集  
(昭和56年12月)
- 19) Price, D.J. and Brown, H.H.: Dust Explosions: Theory and Nature of Phenomena, Causes and Methods of Prevention, NFPA (Boston)  
(1922)
- 20) 柳本竹一, 牧英彦, 小松正樹: 九州鉱山学会誌 Vol. 28, No. 10  
(昭和35年)
- 21) 石浜 渉, 横本 兵治, 関本 善則: 日本鉱業会誌 (投稿中)
- 22) Ishihama, W., Takagi, H., and Enomoto, H.: 18th Intern. Conf. on Sci. Res. in the Field of Safety at Work in Mining Industry, Yugoslavia (1979)  
邦訳: 1979国際鉱山研究会議論文集, 公害資源研究所編
- 23) 文献6)
- 24) Essenhight, R.H. and Woodhead, D.W.: Combustion and Flame Vol. 2  
(1958), also SMRE Research Report No. 166 (1959)
- 25) 鍋谷 弘, 岡田寿徳, 吉田儀一: 採鉱と保安 Vol. 22 No. 4 (1976)
- 26) Lewis, B. and von Elbe, G.: Combustion, Flames and Explosions of Gases  
2nd Ed. p. 369 Academic Press (1961)
- 27) Faraday, M. and Lyell, C.: Philosophical Magazine. Vol. 26, No. 16 (1845)
- 28) Smoot, L.D., Horton, M. D., and Williams, G. A.: 16th Symp. (Intern.) on Combustion, The Combustion Institute (1977)
- 29) Essenhight, R.H.: 16th Symp. (Intern.) on Combustion, The Combustion Institute (1977)
- 30) Howard, J.B. and Essenhight, R.H.: 11th Symp. (Intern.) on Combustion, The Combustion Institute (1967)
- 31) Wheeler, R.V.: Report on the Inflammability and Capacity for Transmitting Explosions of Carbonaceous Dusts, 4th Report H.M.S.O. (London)  
(1913)
- 32) Ostrowski, T., Wolanski, P., Wolski, J., and Wojcicki, S.: Explosion of Dust Mixtures, First National School of Explosibility of Industrial Dusts, Poland (1978)  
English Translation pp. 87~95
- 33) 石浜 渉: 静電気学会誌 Vol. 3, No. 4 (1979)
- 34) Ishihama, W. and Enomoto, H.: Combustion and Flame, Vol. 21 No. 2  
(1973)
- 35) Ishihama, W., Enomoto, H., and Umezawa, M.: Arch. Thermodyn : Spalania, Vol. 7 No. 3 (1976)
- 36) 石浜 渉, 横本 兵治: 安全工学 Vol. 15 No. 5 (1976)
- 37) Bartknecht, W.: 14th Intern. Conf. on Coal Mine Safety Research, U.S.S.R (1971)  
邦訳: 1971国際鉱山保安研究会議論文集(上) 公害資源研究所編

- 38) Nomura, S. and Tanaka, T. : I & EC Process Design and Development,  
Vol. 19 No. 3 (1980)
- 39) Bartknecht, W. : Explosion, Springer - Verlag, (1978)
- 40) Bartknecht, W. : Chem. Eng. Progress Sept. (1977)
- 41) Essenhigh, R. H. and Perry, M. G. : Proc. "Science in the Use of Coal"  
Inst. Fuel London
- 42) 松田東栄, 内藤道夫ら: 第14回安全工学研究発表会講演予稿集 安全工学協会  
昭和56年12月
- 43) JIS Z 8813 浮遊粉じん濃度測定方法通則 (1978)
- 44) 田尻昭英: 作業環境粉じん測定マニュアル 鉱業労働災害防止協会 (1977)
- 45) 木村菊二: 粉塵測定方法 労働科学研究所 (1979)

### 参考文献

#### 圧力放散設備に関する文献

- Bartknecht, W. : Explosion Pressure Relief CEP (Sept. 1977)
- Bartknecht, W. : Explosion, Springer - Verlag (1978)
- 松田東栄, 内藤道夫: 粉じん爆発に対する圧力放散設備, 労働省産業安全研究所 安全資料 (1975)

#### 粉じん爆発一般に関する文献

- Palmer, K.N.: Dust Explosion and Fires, Chapman and Hall (1973);  
〔邦訳: 日本化学会訳編 粉じんの爆発と火災 丸善 (1981)〕
- 隔年開催される国際鉱山保安研究会議論文集  
(1963年以後は全て邦訳されている)。

### 3. ガス・炭じんの着火源

#### 3.1 着火温度

一般に、メタン濃度5～15%のメタン空気混合気は強い発熱反応を起こし、条件によっては爆発する。この反応を引き起こすためには、混合気の一部を一定温度まで加熱する必要がある。この場合の最低温度を着火温度（点火温度）と称する。

メタン空気混合気の着火温度は、加熱方法<sup>\*</sup>およびメタン濃度によって異なった値を示すため、一義的に決定することはできない。これまでよく引用されている計測結果をみると、DixonとCoward<sup>2)</sup>は流動法によって650～750°Cの着火温度を計測している。また、MasonとWheelerはポンベ法によって表1.2.6のごとく696～742°Cの着火温度を得ている。この表から着火温度はメタンの濃度によって異なることがわかる。

表1.2.6 加熱表面によるメタンの点火温度 (Wheeler)

メタン(%)	2.8	3.0	4.0	5.9	7.0	8.0	10.0	14.3
点火温度(°C)	711	700	696	696	697	701	714	742

ただし、円筒石英管(81cm)電気炉加熱

一般に着火温度はメタンの濃度が7%前後で最低となり、最大爆発点の9.5%より下位になる。更に、Dixon<sup>2)</sup>は断熱圧縮法により表1.2.7のごとき結果を得ている。この断熱圧縮法の場合も7%前後で最低を示しているが、流動法およびポンベ法と比較するとかなり低い着火温度を示している。

表1.2.7 断熱圧縮によるメタンの点火温度 (Dixon)

メタン(%)	2.45	3.45	4.7	5.8	6.45	7.45	8.5	9.8	10.0	11.2	12.1	14.1
点火温度(°C)	709	589	493	453	430	428	431	450	453	471	491	518

ただし、内径5.4mmの円筒使用

メタン空気混合気は、着火温度に達しても直ちに発火するわけではなく、一定時間この温度を保たなければ、燃焼しない。この時間のことを着火の遅れと呼んでいるが、これは加熱方法は勿論のこと、メタンガスの濃度、着火温度等の諸条件に支配される。一般に、この遅れは着火温度が高いほど短くなり、メタンの濃度が増加するほど長くなる傾向を示すと云われている。<sup>4)</sup> Dixon<sup>2)</sup>によれば、着火の遅れは最高14秒(濃度8%，着火温度700°C)で、最低0.01秒(濃度6.5%，着火温度1,175°C)となっており、それ以上の着火温度になると遅れは認められない。これら着火の遅れ現象は、メタン空気混合気の発火には温度、時間および放熱面積の3つの条件が関与することを示しており、熱源からガスへの伝熱効率の問題であることがわかる。

一方、炭じんも空気中に浮遊させると、爆発性をもつが、その着火温度は炭じんの粒度および揮発分によって左右させる。一般に、48メッシュ以上の炭じんは着火しにくく、粒度が小さくなるほど着火温度は低くなると云われている。揮発分については多くなるほど着火温度は低くなる。表1.2.8と図

\* 気体の着火温度の測定方法には、流動法、ポンベ法、断熱圧縮法、衝撃波管による方法があって、それぞれ加熱方法が異なる。<sup>1)</sup>

表1.2.8. 炭じんの細かさと点火温度

メッシュ	太さ (mm)	点火温度 (℃)
70~80	0.1790	1,300
90~100	0.1450	
100~110	0.1350	1,005
160~170	0.0925	910
180~200	0.0790	900
200~230	0.0690	870
230~240	0.0640	890
250~270	0.0570	880
300~325	0.0445	900
325以上	0.0430以上	940

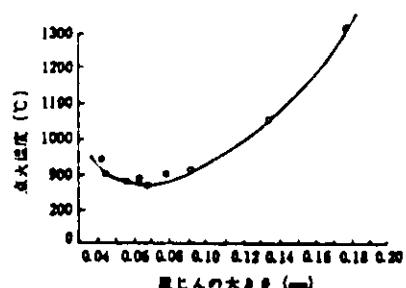


図1.2.12 炭じんの細かさと  
点火温度との関係

1.2.1.2は、黒沢<sup>5)</sup>がウルフボットルを用いて三井砂川炭鉱の堆積炭じんについて着火温度を計測した結果であるが、70~80メッシュの炭じんで1,300℃、200~230メッシュの炭じんで870℃と最低を示している。いずれにしても、炭じんの着火温度はその加熱分解の過程でメタンおよび高級炭水素の発生のほかに水素の発生割合が大きくなるほど着火温度は低くなると考えられている。

### 3.2 着火エネルギー

着火エネルギーとは、可燃性物質混合気を着火させるために供給すべきエネルギーの限界値である。着火エネルギーは、着火源からの熱、光および高エネルギー粒子等の電磁輻射線によって与えられ、その大きさは着火源の強度の外にその作用時間および作用空間に支配される。電気火花のような小さな着火源の場合には、小さな空間にごく短時間しか作用しないため着火エネルギーはごく少量ですむ。したがって、一般には火花放電による着火エネルギーが計測値として信頼されている。この場合、着火エネルギーEは次式で求められている。

$$E = \frac{1}{2} C (V_1 - V_2)^2 \quad \dots \quad (1.2.1.2)$$

ただし、Cは容量で、V<sub>1</sub>、V<sub>2</sub>は放電前後の電圧である。

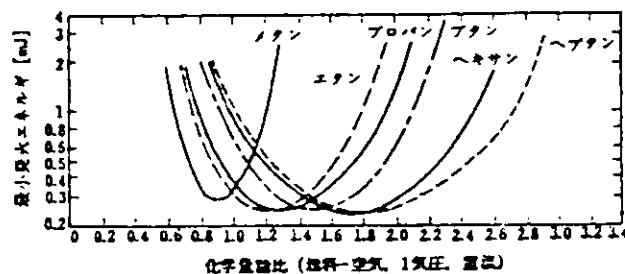


図1.2.13 混合気の組成と最小発火エネルギー

図 1.2.13 は、火花放電によって求められた最小着火エネルギーと濃度（化学量論比）の関係であるが、メタンの場合、濃度 8.5 % 程度で着火エネルギーは最低となり、その前後で次第に上昇している。他の高級炭化水素と比較すると、メタンは濃度影響が著しいことがわかる。また、メタンは濃度不足側で、高級炭化水素は過剰側で着火しやすい傾向がある。一方、図 1.2.14 は、炭じんの最小着火エネルギーと濃

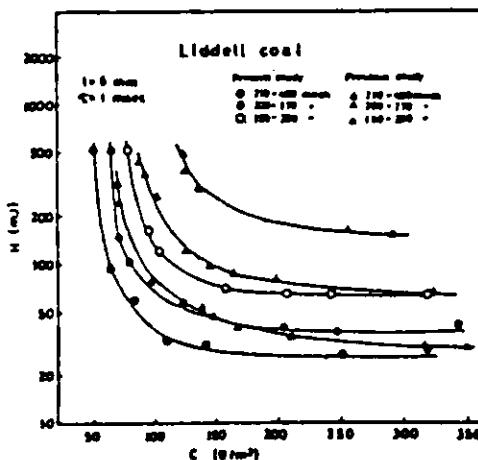


図 1.2.14 炭じんの濃度と最小着火エネルギー

度の関係で、石浜等<sup>7)</sup>によって求められたものである。この場合、濃度が大きくなるにつれて着火エネルギーは減少し、270~400 メッシュの炭じんは約 3.0 mJ に収束している。この炭じんの着火エネルギーはメタンの 100 倍であり、この結果から炭じんがメタンにくらべて非常に着火しにくいことがわかる。炭じんの着火エネルギーは、粒度および揮発分の量によっても変化するが、一般に、粒度が小さく揮発分の多いものほど着火エネルギーは低くなると云われている。

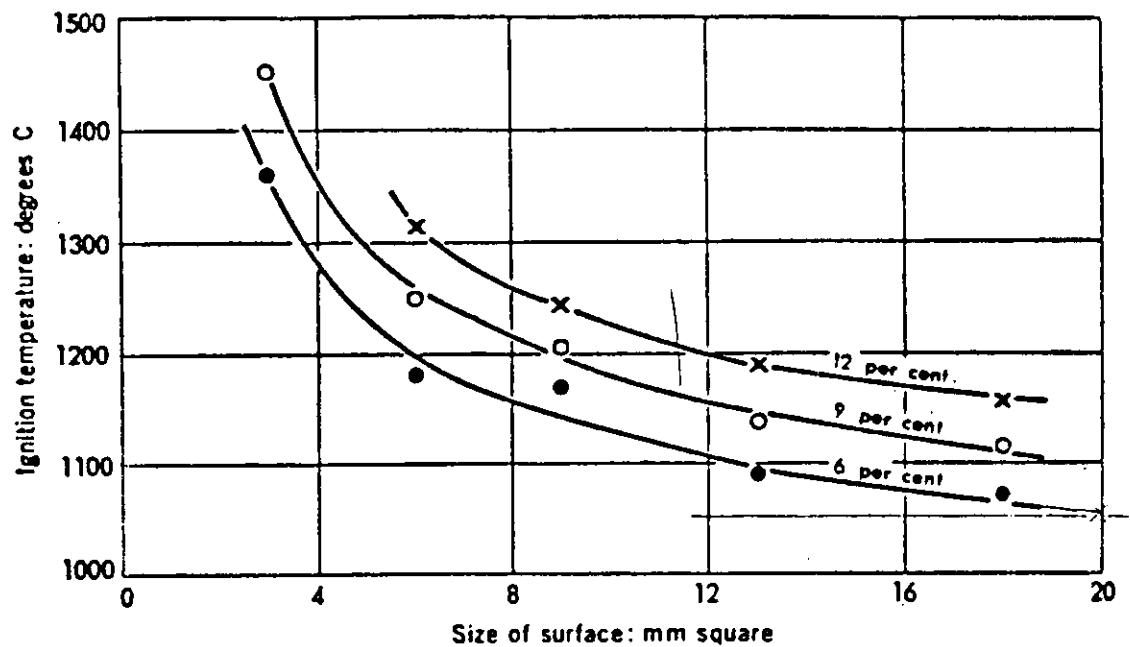
### 3.3 着火源の種類

#### 3.3.1 メタンの着火源

メタンは、可燃性ガスの中でも最も着火しにくいガスではあるが、すでに述べたごとく加熱地面の場合 700°C 前後で、断熱圧縮の場合 430°C 程度の温度で着火する。また、火花放電の場合 0.3 mJ 程度のエネルギーで着火する。このような条件を満たす着火源としては、多種多様な熱源が考えられる。これまで問題となった着火源は、加熱表面、火炎、摩擦熱、電気火花、断熱圧縮および衝撃波等の熱源である。以下、これらの着火源の内容と問題点について述べる。

##### (1) 加熱表面による着火

メタン空気混合気は、700°C 以上の加熱表面に触れると着火する。この場合、メタンの濃度の外に加熱表面の面積と触媒としての物理化学的性質が影響することが指摘されている。図 1.2.15 は加熱面積と着火温度の関係であるが、<sup>8)</sup> 加熱面積が小さくなれば高い着火温度が要求されることがわかる。この場合の特徴としては、メタン空気混合気の対流が起こるために着火の遅れができる。



VARIATION OF MINIMUM IGNITION TEMPERATURE WITH  
SIZE OF SURFACE FOR THREE METHANE CONCENTRATIONS  
(Surface in the floor)

図 1.2.15 加熱面積と着火温度の関係

(2) 火炎による着火

火炎は、温度が高く、メタン空気混合気と触れあい、容易に着火を引き起こす。古くは安全燈で高温の燃焼ガスを金網で冷却する方法が採用された。<sup>9)</sup>

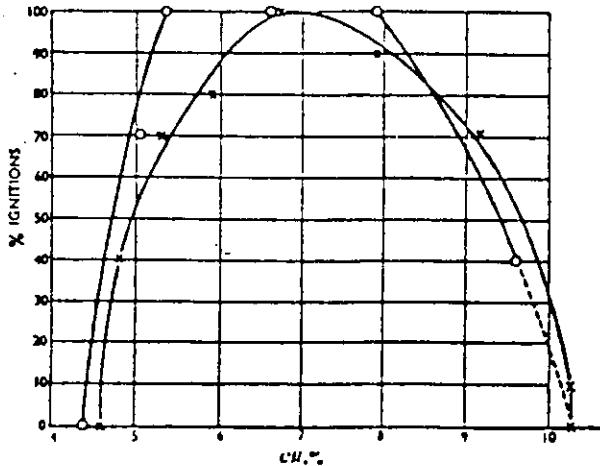
(3) 摩擦熱による着火

摩擦熱による着火現象は複雑であるが、着火源としては摩擦面の加熱と摩擦火花の2つが高速度写真等で確められている。

摩擦面の加熱は、熱伝導率の低い非金属材料で容易に起り、その材料の融点まで温度上昇する。したがって、融点の高い材料ほどよく着火を起こすが、摩擦面がわずかでも削り取られる場合には、摩擦面の温度上昇は起ららず、着火もしない。<sup>10), 11)</sup> なお、黄鉄鉱等の硫化物との摩擦では硫黄の燃焼によってメタン空気混合気への着火が起こることが指摘されている。<sup>12)</sup>

摩擦火花については、スチールミル(照明具)の問題があったせいか古くから論争されているが、未だ不明確な点が多い。特に、炭素鋼から発生する摩擦火花では実験的手法ではメタン空気混合気に着火させることに成功していないが、現場では諸外国を含めて着火した例がいくつか報告されている。<sup>12)</sup> 一般に、炭素鋼の摩擦火花は、火花粒子の炭素量の減少から1,450°Cの温度になると云われているが、粒子が小さくガスとの接触時間が短いため水素等の着火エネルギーの低いガスには着火できても、メタンガスには無理であると考えられる。

摩擦火花で最も問題になっているのは、鋼材とマグネシウム合金、アルミニウム合金との摩擦に



Graph showing the effect of methane concentration on the probability of ignition  
O — DTD363      X — HE10WP

図 1.2.16 軽合金の衝撃摩擦における着火率

よって生じるフラッシュ状の火花である。この場合、鋼材の表面が錆びていて、多少の湿気を帯びていると、衝撃摩擦によって起こるフラッシュ状の火花はメタン空気混合気に着火する。図 1.2.16 は、混合気中のマグネシウム合金 (DTD 363) およびアルミニウム合金 (HE 10 WP) の衝撃摩擦における着火率である<sup>13)</sup>が、7% 前後で最も高い着火率を示している。この着火の機構としては軽合金粉末の燃焼であるという説とテルミット反応であるという説があるが、高速度写真による判定によれば、いずれの場合にも着火することが報告されている。

#### (4) 電気火花による着火

電気火花には、火花放電、アーク放電および静電気放電<sup>\*</sup>の3種類があって、いずれもメタン空気混合気に対してわずかなエネルギーで着火する能力をもっている。したがって、これまで詳細な研究がなされている。

火花放電は、電極間の気体が絶縁破壊をして電離したとき最初の瞬間に起る気中放電で、そのエネルギー  $E_c$  は電圧  $V$  と容量  $c$  によって次式で与えられる。

$$E_c = \frac{1}{2} V^2 C \quad \dots \quad (1.2.13)$$

アーク放電は、火花放電に続いて起こる持続時間の長い放電であるが、そのエネルギー  $E_L$  は電流と回路のインダクタンス  $L$  によって決まる。

$$E_L = \frac{1}{2} I^2 L \quad \dots \quad (1.2.14)$$

一般に、アーク放電は永続性をもっているために、着火の危険性は火花放電より高い。図 1.2.17 ~ 図 1.2.19 は、メタン空気混合気への  $V$  と  $C$ ,  $I$  と  $L$  および  $I$  と  $V$  の着火限界線である<sup>14)</sup>。メタン空気混合気中でも安全な電気回路を本質安全回路と云うが、この回路設計に当っては電圧、電流、容量およびインダクタンスをこれらの限界線以下になるようにバリア回路が設けられる。

なお、静電気放電によるメタン空気混合気への着火は以前から実験的に確認されていたが、最近これに起因すると考えられる坑内爆発事故があってから、重要な問題となってきている。船舶においても重要な問題と思われる所以、この詳細については別に節を設けて述べる。

\* 火花放電の一種であるが、ここでは分けて取扱う。

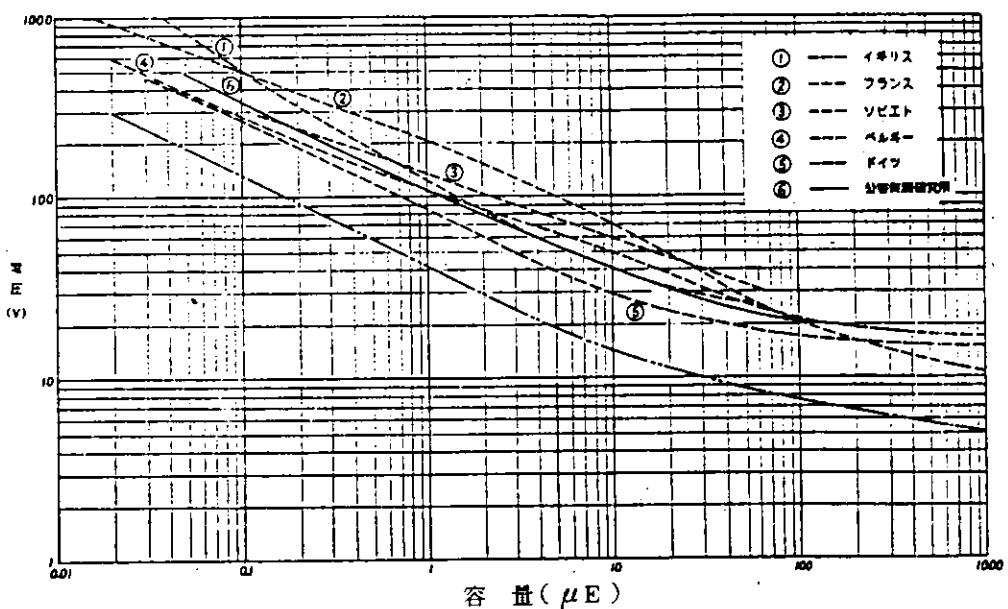


図 1.2.17 容量回路の点火電圧

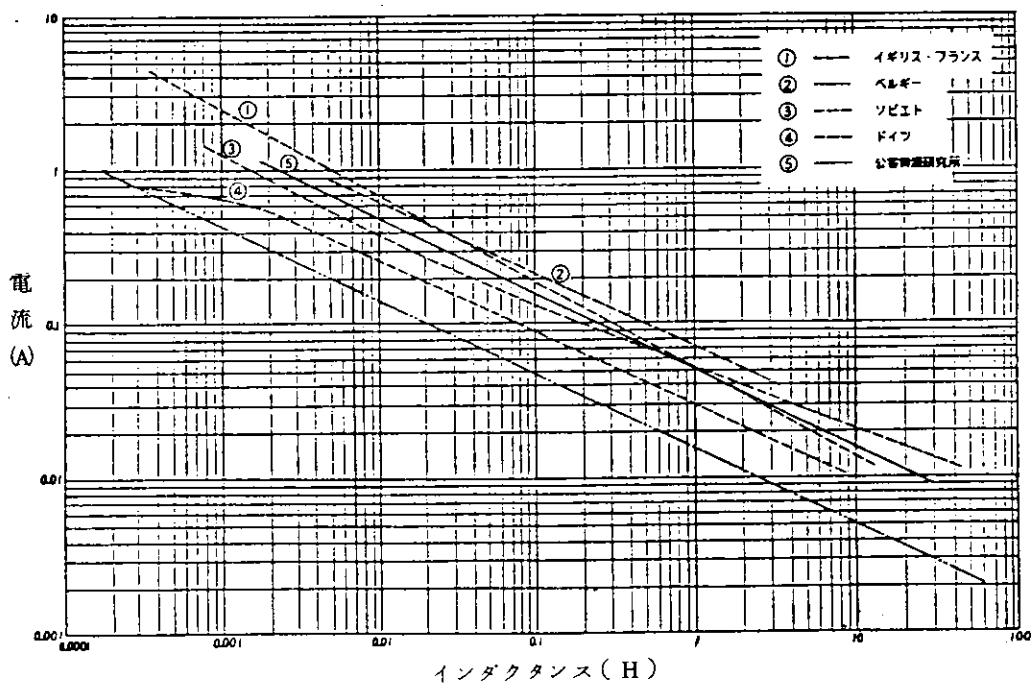


図 1.2.18 誘導回路の点火電流

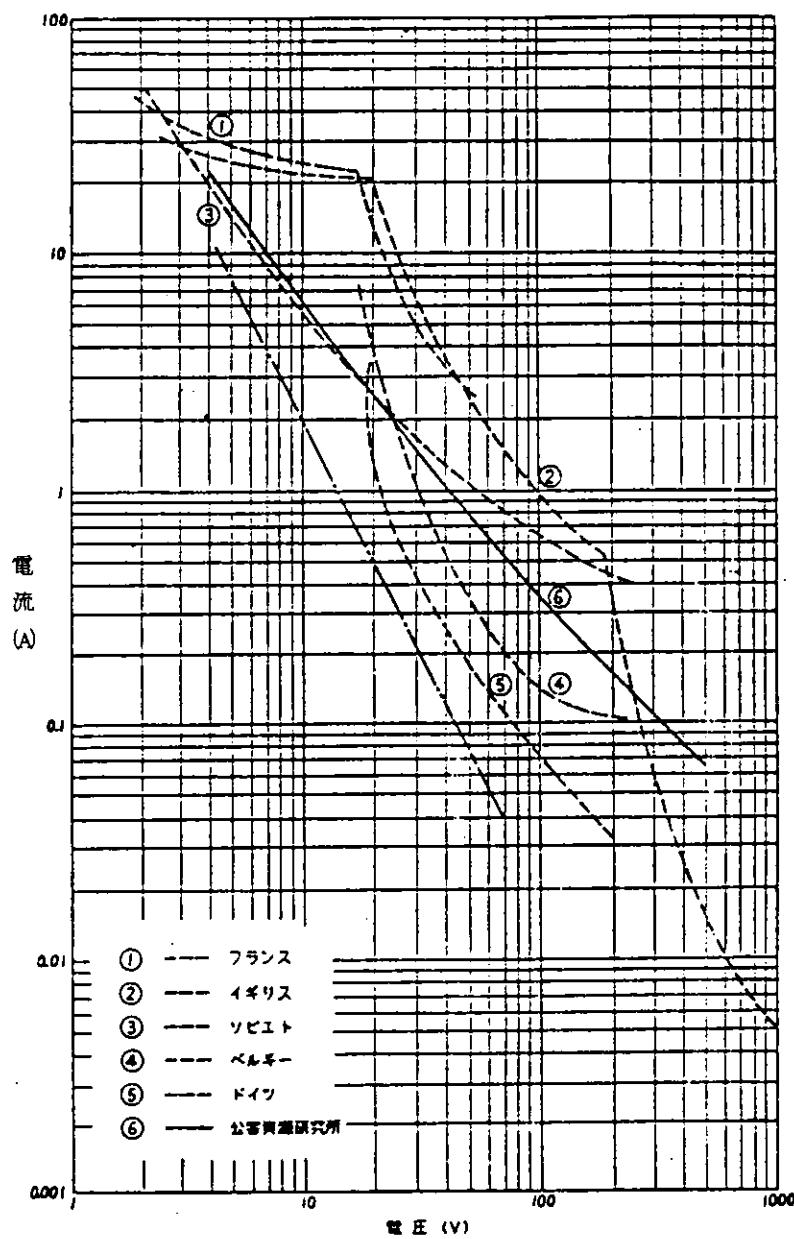


図 1.2.19 直流無誘導回路における点火電圧・電流

##### (5) 断熱圧縮および衝撃波による着火

メタン空気混合気が急速に圧縮されると、断熱変化による温度上昇で着火する。このときの上昇温度  $T_2$  は、圧縮前の温度を  $T_1$ 、圧縮容積比を  $V_2 / V_1$ 、圧力比を  $P_2 / P_1$  とすると次式で与えられる。

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{K-1}{K}} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \quad (1.2.15)$$

ただし、 $K$  は混合気の比熱比である。Dixon<sup>2)</sup>によれば、12~20 kg/cm<sup>2</sup>まで断熱圧縮すると、着火温度の節で述べたごとく 6.45~8.5 % のメタン空気混合気は 430 °C と低い温度で着火する。この着火機構は坑内におけるガス爆発の伝播機構を説明する上で有力な論拠となっている。

#### 3.3.2 炭じん爆発の着火源

炭じん爆発の場合、着火の原因となる熱源としては、1) ガス爆発 2) 発破 3) 動力ケーブル切断時のアーク放電等が考えられている。いずれの場合にも堆積炭じんを浮遊させるような事象を伴ったとき着火する。

石炭焚き船においては、発破、動力ケーブル切断、摩擦熱などによる炭じんへの着火は全く考え難く、僅かにメタンによるガス爆発または静電気が炭じん爆発の着火源としての可能性が考えられる。

メタンによるガス爆発の可能性がありうるのはコール・バンカまたはディリード・サービス・ホッパである。このような箇所でガス爆発が発生するのは、バンカまたはホッパ中の石炭から発生したメタンが 5~15 % の濃度範囲で存在し、かつ十分な濃度の酸素が存在する条件下で前述した何らかの着火源が存在または発生した場合である。しかし、バンカまたはホッパが適正な換気が行われていれば爆発範囲のメタンが停滞するおそれは極めて少なく、もし十分に気密であるならばメタンの濃度は高くなても、酸素は石炭の吸着によってその濃度が減少し、メタンの着火は起り難くなる。すなわち、バンカまたはホッパ内部でガス爆発の発生する可能性は極めて少なく、したがってガス爆発による炭じん爆発の可能性もまた少ない。

コール・バンカからボイラまでに至る空気輸送パイプ系内における輸送石炭により発生する静電気は、パイプ内の炭じんの着火源となりうるが、その防止対策により炭じん爆発のおそれは少ない。

### 3.4 静電気

#### 3.4.1 静電気の放電エネルギー

静電気はそれが発生し帯電した結果生ずる電界がある限界、すなわち、媒質の絶縁破壊強度（空気中の火花放電発生電界強度は  $30 \text{ kV/cm}$ ）を超えると放電が起って電荷が中和するとともに、電界中に貯えられたエネルギーの一部または大部分が放電路に主として熱エネルギーとして放出される。

この放電をガス・炭じん爆発の着火源として考える場合、そのエネルギーはコンデンサに貯えた電気エネルギーを短かい放電間隔を通して火花放電として放出させた場合のエネルギーとして考える。

したがって、放電エネルギーは静電容量  $C[\text{F}]$  のコンデンサを電圧  $V[\text{V}]$  に充電したのちにこれを放電させると、放電路には

$$W = \frac{1}{2} CV^2 [\text{J}] \quad (1.2.16)$$

のエネルギーが放出されるとして計算できる。ガス、炭じんには各々最小着火エネルギーが存在するので、放電路に放出されるエネルギー  $W$  がこの値を超えるとその放電は爆発の着火源となる<sup>15)</sup>

実際には、液体お粉体等が流動、噴出をする場合に発生帯電する静電エネルギーは個々の場合について調べられた例がある。

炭鉱においては炭じん爆発を防止するための一手段として、炭じんが堆積する坑道に岩粉を圧縮空気を用いて噴射することがある。噴射機の原理は容器に入れられた岩粉を圧縮空気を用いて吸い上げ、その圧気と岩粉をホース及び先端の噴射用鉄管を通じて坑道に噴射するものである。この場合は相当量の静電気が発生するが、接地をした場合は  $2 \times 10^6 \Omega$  以下の接地抵抗でメタンに対して安全となっている。<sup>16)</sup>

また、一般に輸送された粉じんが帯電したままタンク内に放出されると、浮遊粉じんは空間電界を形成する。実際には粉じん爆発の場合、流送における静電気の火花放電が直接の原因となった例は少ない。輸送系の爆発は管内よりもタンクなどの終端で生じており、タンク内の粉粒体の充填率が小さい状態のときが危険性が大きい。

タンク内へ放出された粉じんが作る空間電界強度と放電の可能性についての実験例は不明であるが、タンカーのタンク内の洗浄に関する実験例はある。ここで両者が大きく異なるところは洗浄水は高圧でノズルより噴射するのに対して粉粒体の輸送は輸送圧で輸送管より放出される点である。

タンカーに関する実験では、実測した結果を用いてタンク内に形成される電界と電位を、単純な球形タンクを仮定して空間電荷に関する各値を求めて、これより推定している。半径  $r_w$  の球内に電荷密度  $S \text{ C/m}^3$  の帯電ミストが均一に分布している場合の電界の最大値  $E_{\max}$  は、

$$E_{\max} = \frac{Sr}{3\epsilon} [\text{V/m}] \quad (1.2.17)$$

電位  $V_{\max}$  は、

$$V_{\max} = \frac{Sr^2}{6\epsilon} [\text{V}] \quad (1.2.18)$$

タンカーにおいて清浄海水を使用したタンク洗浄によって生ずる帯電ミストの電荷密度実測値の平均として、 $S = 4 \times 10^{-8} \text{ C/m}^3$  を用い、 $r = 6 \text{ m}$ 、（容積  $800 \text{ m}^3$  のタンク）、 $\epsilon = 1/36\pi \times 10^9 \text{ F/m}$ （空気の誘電率）を入れると、電界強度  $E_{\max} = 9 \times 10^3 \text{ V/m}$ 、静電誘導に関連のある空間電位  $V_{\max} = 27 \text{ kV}$  となる。これより放電の危険性を考えると、タンク内面が平滑であれば電界の最大値が  $E_{\max} = 0.09 \text{ kV/cm}$  であり、空気中の絶縁破壊値  $30 \text{ kV/cm}$  よりもはるかに近い。最悪の条件として内壁に突起物があり、電気力線が全部これに集中していると仮定すると、突出部の半

径  $r_1$  [m] の球電極へ半径  $r_2$  [m] の球状電荷から電気力線が全部集中していると、電界の最大値は二つの球の中心線上の  $r_1$  球電極面に生ずる。両球の中心距離を  $d$  [m]、電荷雲の総量を  $Q$  [c] とすると、

$$E_{\max} = \frac{Q}{4\pi\epsilon r_1 d (1 - r_1/d)} [\text{V/m}] \quad (1.2.19)$$

で与えられる。一例として、 $r_1 = 10^{-2}$  m,  $r_2 = 6$  m,  $d = r_2 = 6$  m,  $Q = 3.2 \times 10^{-6}$  c ( $4 \times 10^{-8}$  c/m<sup>3</sup> × 800 m<sup>3</sup>)を入れると、 $E_{\max} = 48$  kV/cm にもなる。ただし、突出部が  $n$  個あれば  $E_{\max}$  は  $1/n$  に分散する。<sup>17)</sup>

なお、静電誘導に関する空間電位については静電誘導を受ける物体、すなわち、絶縁された導体がタンク内に存在する条件が必要であり、これは粉粒体の場合は実際上あまり考えられない。

### 3.4.2 静電気の発生

ガス・炭じん爆発の着火源の一つに静電気の火花放電がある。ここでは放電火花を発生させる静電気の発生と帶電について簡単に述べ、流動帶電については次節で詳述する。

粉粒体の流動および噴出による帶電の状態は図 1.2.20 のように考えられる。管内を気体と固体の混合物が流動するときは、摩擦帶電として考えられる。固体の表面は凹凸があるので、圧力を加えた

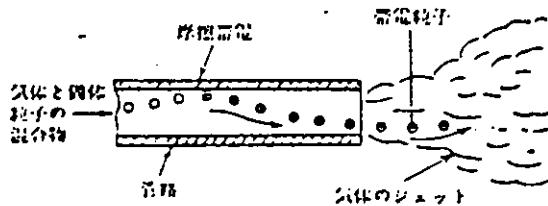


図 1.2.20 固体粒子の噴出帶電

り摩擦したりすることによって接触部の数とその面積がふえ、帶電量は増加する。したがって、流動による摩擦帶電の場合は単純な摩擦による帶電の他に発熱や表面の変形、破断などの現象が更に帶電量を増加することも考えられる。

また、実際の帶電状況は複雑で、例えば、電荷のもれがあり、正味の帶電量とその存在時間は物体の電気的中性化の速度に関係し伝導度に依存するなど、多くの要素が加わってくる。

実際の帶電現象に關係すると考えられる要素としては、

物体の性質 : 全体的な化学組織、表面の化学組織、分子構造、配置、結晶構造、歪状態、大きさ、形、電荷の状態

周囲の条件 : 温度、湿度、気体の組成と圧力、電磁場の有無

力学的条件 : 接触の型、接触中の配置、接触面積、接触時間、2物体の相対速度、力、等があげられる。これらの要素のうちで比較的重要なものは、物体の大きさと形、電荷の状態、湿度、接触面積、相対速度および力である。そして、これらの効果は飽和電荷までの範囲内に限定される。<sup>18)</sup>

### 3.4.3 静電気の流動帶電

ここでは流動帶電に限定して述べるが、液体に関する実験が多く、粉粒体に関するものは少ないので、まず、参考として液体について述べたあと、粉粒体について述べる。

### (1) 液 体

液体をパイプで輸送するときに発生する流動電流は層流のときは管径によらず流速に比例し、乱流のときは管径の 0.75 乗に比例し、平均流速の 1.75 乗に比例すると云われている。これらに関する実験は多くなされており、液体によって異なるが流速の 0.5 乗から 4 乗位の間の広い範囲で比例関係がえられているようである。大体において導電率の低い油は比例に近く、導電率の高い ( $10^{-10} \text{ S/m}$  以上) ものは 1 以上のべきで増加すると云われている。十分長いパイプとしての流動電流について表 1.2.9 のようなものが提案されている。これによれば、大体流速の 2 乗位に比例するものとしてよいようである。また、現在よく用いられている許容流速は表 1.2.10 に示されるようである。<sup>19)</sup>

また、灯油では鉄管の場合に較べて塩ビパイプの場合の方が約 100 倍の帶電を示した例がある。これは輸送管の材質が帶電に大きな影響を与えることを示している。

表 1.2.9 流動電流の実験式

提 案 者	実 験 式
Koszman, Gavis	$i_{\infty} = A_1 v^{1.38} d^{0.38}$
Schön	$i_{\infty} = A_2 v^2 d^2$
Gibson, Lloyd	$i_{\infty} = A_3 v^{2.4} d^{1.6}$

$v$  は平均流速、 $d$  は管の直径

表 1.2.10 許容流速

直 径 [mm]	流 速 [m/s]
25	5.0
50	3.5
100	2.5
200	1.7
300	1.1

ただし異種液体の混入したものやエーテル、 $CS_2$  のような危険なものでは 1 m/s 以下とする。

### (2) 粉 粒 体

粉粒体の流動帶電に影響を及ぼす因子は、物体の流動量、粒度、表面状態、電気抵抗、輸送管の形状、流送速度、距離、雰囲気の湿度等である。<sup>20)</sup>

#### (a) 粉体の流動量

輸送量が増すとともに帶電量も増加するが、それは、無制限に大きくはならず、ある値で飽和し、そのときの帶電量と輸送量とはある関係を示す。ある実験例では、輸送量が  $0.15 \sim 0.3 \text{ kg/m}^3$  附近を境として異った傾向を示している。その模様は図 1.2.21 のようである。この場合の

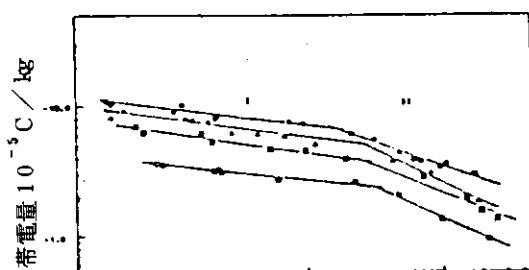


図 1.2.21 ○··· $7.56 \text{ m/s}$ , ×··· $11.3 \text{ m/s}$ , △··· $14.5 \text{ m/s}$ , □··· $17.9 \text{ m/s}$

相違は流動状態が異なることに起因しているようだ。図 1.2.21 の左の領域の場合の流れはほぼ均一流に近く右の部分は管の底部に流動物がよどみ管底流あるいは部分流に近い流動状態を示している。<sup>21)</sup>

また、一般に輸送量は大きくなると帶電効果は減少し、短時間で、平衡値に達する。これは輸送量の増加と共に、管壁に接触しうる粒子数が限定されるためであろう。<sup>4)</sup>

#### (b) 粉体の粒度

粉体の場合、粒径は数 $\mu\text{m}$ 以上の粒子では直径の小さな粒子ほど帯電量が大となり、例えば、エポキシ樹脂では44～74 $\mu\text{m}$ の粒子0.707gが103～173 $\mu\text{m}$ の粒子0.709gの約1.5倍の帯電電位を示している。<sup>20)</sup> 飽和電荷量としては粒径の大きいもの程大であるが、空気輸送で塊と粉が混在する場合は粉じんが管壁に付着して、塊の管壁との直接的接触が妨げられ、電荷の発生が少なくなることもある。<sup>18)</sup>

#### (c) 粉体の表面状態

粉体の表面状態は化学組成以上に帯電に大きな影響を与える。すなわち、表面の汚れ、不純度、吸着物などに帯電が左右されるため、粉体の物性から帯電量を計算したり、帯電過程を詳細に知ることは困難である。<sup>20)</sup> 例えば前述のような塊と粉との混在の場合の他に、表面に他の親水性または導電性の物質が付着した場合には流れ経路の電気抵抗が小さくなることも同様な例である。

#### (d) 電気抵抗

粉体の電気抵抗が小さければ粉体円での電荷移動が容易となるから、静電気が発生しても流れ経路から漏洩するので電荷の蓄積は少なくなる。電気抵抗が大の場合はその逆である。<sup>20)</sup> 石炭は導体であるが微粉にするとよく帯電し、しかも、流動床に入れて流動化すると微粉の衝突、摩擦による帯電は灰分の多少によって極性が異なることが明らかになっている。<sup>22)</sup>

#### (e) 輸送管の形状、材質

粉粒体の管壁との接触の程度が発生に関係することから考えても、輸送管の屈曲部やしづり部があると帯電量は大きくなる傾向があるが、粉体流量によっては発生電流の符号が逆転することもあるため、とくに、粉体流が局所的に高濃度となるような場合は条件によって帯電が促進されるとときと帯電が除去されるときがある。<sup>23), 24)</sup>

また、輸送管の材質は管が金属管である場合は輸送する粉粒体が金属でなければ金属管の種類には余り関係しない。なお、灯油の場合の管の材料の相異による例は前述のとおりである。また装置全体としては閉回路系に多く発生している。

#### (f) 流送速度

管内における輸送速度は局部的には輸送手段としての流体の速度と輸送物の速度は異なると思われるが、今までに行われてきた粉粒体の流動帶電に関する実験では大部分は100 $\mu\text{m}$ 以下程度の粒度であるので、ここでは両者を一つの流体として考える。

石油類の場合の流動電流が大体流速の2乗に比例することは前に述べたが、粉体の場合も同様に流速の $1/2$ ～2乗に比例することが示されている。<sup>25), 26)</sup> 飽和電荷量は流れ経路に依存する。また気体の種類は帯電には余り関係がないようである。<sup>19)</sup>

ある実験では、けい砂、ガラスビーズ、ビニクロロン、小麦粉等の流動帶電を長さ140cm、径2"の鋼管とベンチュリー型の塩ビ管を用いて調べている。それによれば、図1.2.22, 図1.2.23

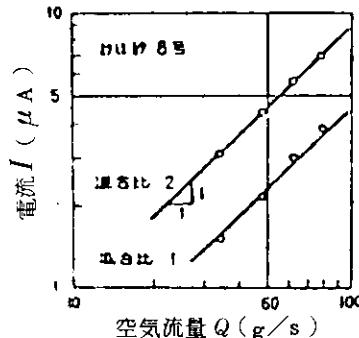


図1.2.22 空気流量による発生電流の変化(けい砂8号)

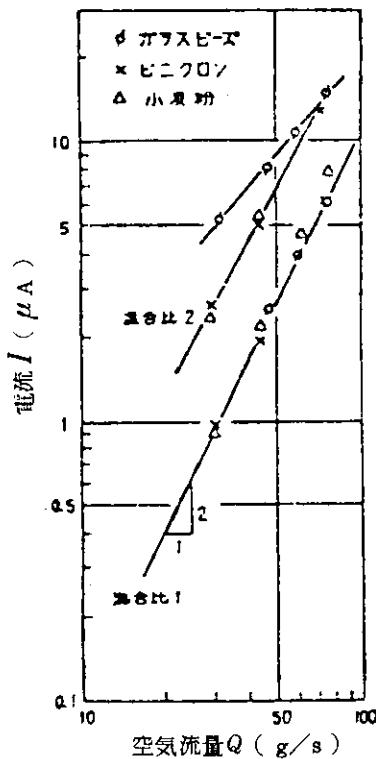


図 1.2.23 空気流量による発生電流の変化

のようであり、厳密には粉体流量と空気流量を区別しなければならず、けい砂は発生電流が粉体流量のみに依存し、それ以外の試料は空気流量の影響を受けている。<sup>25)</sup>

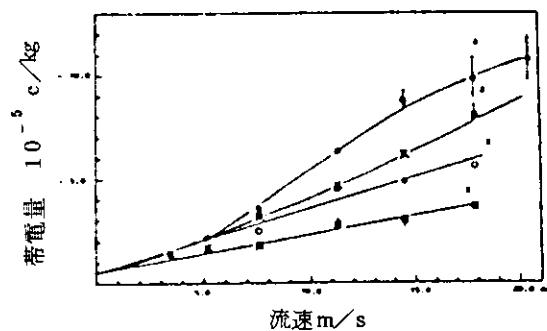


図 1.2.24 流速と帯電量

また、他の実験では帯電量と流速について図 1.2.24 のような関係がえられている。図中、A は流送量が  $0.0063\sim0.0103 \text{ kg/m}^3$ 、B は  $0.0188\sim0.0310 \text{ kg/m}^3$  で、これらは図 1.2.21 の左の領域で、C は  $0.102\sim0.223 \text{ kg/m}^3$  で変曲点近傍、D は  $0.564\sim0.852 \text{ kg/m}^3$  で変曲点より右の領域である。

A, B は流速が  $7.5 \text{ m/s}$  よりも大きくなると流速の増加とともに帯電量は飽和する傾向を示し、C, D は直線的に増加している。<sup>21)</sup>

さらに、ある例では塩化ビニル粉じんの輸送速度と発生電荷量との関係を図 1.2.25 で示している。<sup>17)</sup>

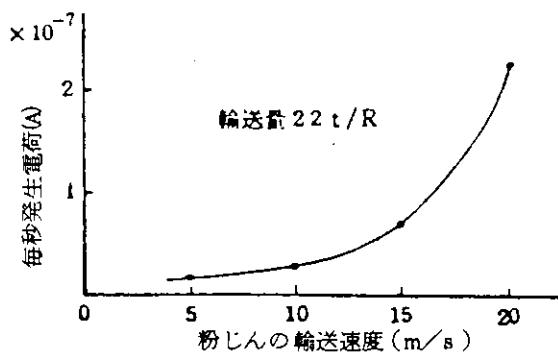


図 1.2.25 塩化ビニル粉じんの輸送速度と発生電荷量

#### (g) 流送距離

輸送距離とともに発生量も増加するが、ある距離で飽和に達する。

ある実験例では、ラジエータのような曲管と直管の集合管（銅製、 $20\text{ mm}\phi$ 、直管長 $1\text{ m}$ ）中にナイロン 12 の粉体を流した場合、図 1.2.26 のように、帯電量は流速が一定であれば濃度にあまり関係がなく、ある距離で飽和に達する。図中、 $n$  は曲直管各 1 個の組合せ数を表わしている<sup>27)</sup>。

また、他の実験では、管長が長いと、ある距離に至って帯電量は小さくなっている。 $7\text{ mm}\phi \times 100\text{ m}$  のナイロンチューブにフライアッシュを混入した空気を流した場合、電荷量は約 $30\text{ m}$  で最大、約 $60\text{ m}$  で最小となり、そのあとに極性が逆転している。<sup>28)</sup>

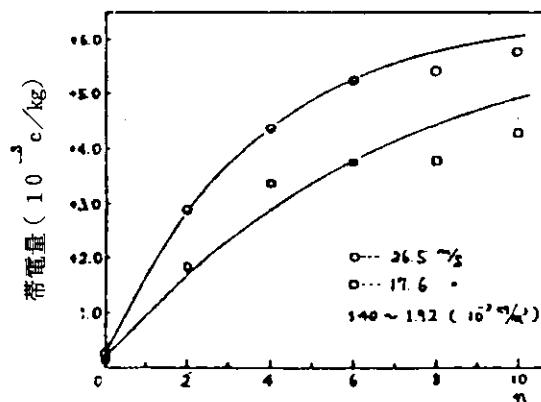


図 1.2.26 ナイロン粉体の帯電量と輸送距離との関係（輸送量一定）

#### (h) 霧囲気の湿度

流送に用いられる気体の霧囲気の相対湿度は帯電に重要な要素である。一般的には霧囲気の相対湿度が 70% を超えると帯電が減少すると云われている。

ある実験例では図 1.2.27 のように、相対湿度の影響の大きいことがよく判る。<sup>17)</sup>

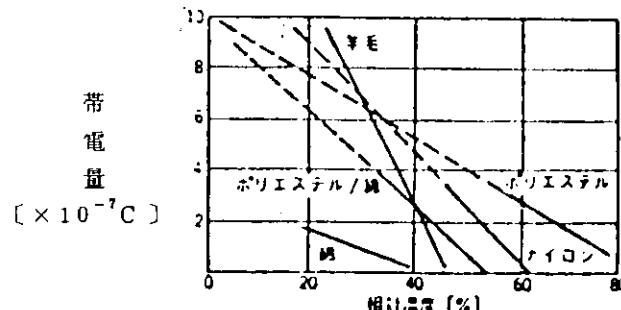


図 1.2.27 各種繊維素材からなるシャツの帯電性

（綿 100% 肌着着用,  $25^{\circ}\text{C}$

実線：放電なし, 点線：放電あり）

### (3) 人 体

人体はその動作が帯電物体からの静電誘導によって帯電する。ここで云う人体とは人体そのものと通常身につけている衣服、履物を含めたものを云う。人体の動作と帯電の状態は表1.2.1 1 のようである。<sup>17)</sup> 人体が帯電すると不快、恐怖感等による事故、放電によるガスへの着火の事故等が

表 1.2.1 1 人体動作と人体の帯電

人体の動作	人体帯電電位 (kV)	備 考
ナイロンカーペットの上を歩行	2.0～2.5	履物：運動靴
ナイロンカーペットの上ですり足運動	4.5	履物：運動靴
ソファから立ち上る	3.5～4.5	衣服：レーヨン綿混
アクリルセータの脱衣	4.5～5.0	
ボリエステル作業服の脱衣	4.0～4.5	下着：アクリルセータ
アクリル毛布の折りたたみ作業	5.0～6.0	衣服：レーヨン綿混

(注) 温度 20°C 相対湿度 30%

(Electrostatics in the Electronics Environment)

起る可能性がある。人体の静電容量は約 100～200 pF であり、衣服の着脱時には条件によっては数 10 kV の電位を生ずることもあるのでメタンの着火の可能性がある。

なお、人体帯電と電撃との関係は表1.2.1 2 のようである。

表 1.2.1 2 人体帯電と電撃の関係

(産安研「静電気安全指針」)

人体帯電電位 [kV]	電 撃 の 程 度	備 考
1.0	全く感じない	
2.0	指の外側に感じるが痛みなし	かすかな放電音発生(感知電圧)
2.5	放電した部分が針でさわられた感じ、ビクリと感じるが痛くない	
3.0	チクリとした痛みを感じる、針でさされた感じを受ける	
4.0	指にかすかな痛みを感じる、針で深くさされた痛みを感じる	放電の発光を見る
5.0	手のひらないし前腕まで電撃を感じ痛い	
6.0	指に強い痛みを感じ、電撃を受けた後腕が重く感じる	
7.0	指、手のひらに強い痛みとしびれた感じを受ける	
8.0	手のひらないし、前腕までしびれた感じを受ける	
9.0	手くびに強い痛みと、手がしびれた重みを感じる	
10.0	手全体に痛みと電気の流れた感じを受ける	
11.0	指に強いしびれと、手全体に強い電撃を感じる	
12.0	強い電撃で手全体を強打された感じを受ける	

(注) 人体の静電容量 90 pF

#### 3.4.4 帯 電 防 止

帯電の防止とは、静電気の発生を防ぐことと、それが困難である場合には発生帯電したものの電位の上昇をできるだけ防ぐことである。

### (1) 接 地

接地は静電気対策と基本である。静電気防止用の接地は電力系統の接地と異なり、通常は $10^6 \Omega$ 以下の抵抗であればよいと云われている。この値が如何なる環境条件においても実現されぬようにはするには気温 $20 \pm 15^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $65 \pm 20\%$ において $10^6 \Omega$ 以下であることがのぞましい。<sup>17)</sup>

ここで注意することは、接地は金属と大地との電気的接続であるから、接地する直接の対象は金属物体である。たゞし、金属物体以外でも次のものはこれと十分に密着する金属を取り付けてその金属を接地することができる。

- 1) 体積固有抵抗が $10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 以下、または表面固有抵抗が $10^9 \Omega$ 以下のもの。
- 2) 体積固有抵抗が $10^6 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 、または表面固有抵抗が $10^9 \sim 10^{10} \Omega$ のもので、物体がほぼ静止状態に近く静電気の発生が比較的少ない場合。

体積固有抵抗が $10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ 以上、かつ、表面固有抵抗が $10^{10} \Omega$ 以上のものは接地の対象とならない。<sup>17)</sup>

また、接地とは電位を下げる云うことが目的であって、静電気の発生を防止するのではないこと、また、例えば、パイプを接地しても中を流れる物体は逆の極性に帯電していると云うことを忘れてはならない。

### (2) 導電性の増加

静電荷を早く緩和させて電位を下げるのに、使用材料の導電性を増すと云う方法がある。それは材料によって種々の方法があるが、例えば炭鉱用ビニル風管やシート類はカーボンをある繊維を織り込んだ布をはさむ。二枚のうち一枚にカーボンをプリントしてこれを内側にして貼り合わせる等種々の方式の製品が開発されている。

### (3) 導電性繊維

従来、木綿の衣服は導電性があると思われていたが、最近実測した例によると表1.2.1.3のようであり、この場合、 $10 \mu\text{c}/\text{m}^2$ で着火の危険があるので何れも危険である。ただし、雰囲気の相対温度の影響は大きく、同じ服の生地を湿度を変えて経験した結果は図1.2.2.8のようであった。同図は帯電の湿度への依存性の大きいことを示している。

表 1.2.1.3 木綿作業服の摩擦帶電試験結果

(産安研にて測定)

試験番号	最大帯電電荷密度 ( $\mu\text{c}/\text{m}^2$ )
1	1 4.9
2	1 6.3
3	1 5.3
4	1 5.7
5	1 6.1
(平均値)	( 1 5.7 )

(注) (1) 試験方法は J I S L 1094 の摩擦帶電試験に準ずる。

(2) 標準布はアクリル、温度 $23^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $30\%$

(3) 試料はいずれも洗たくを行った使用品

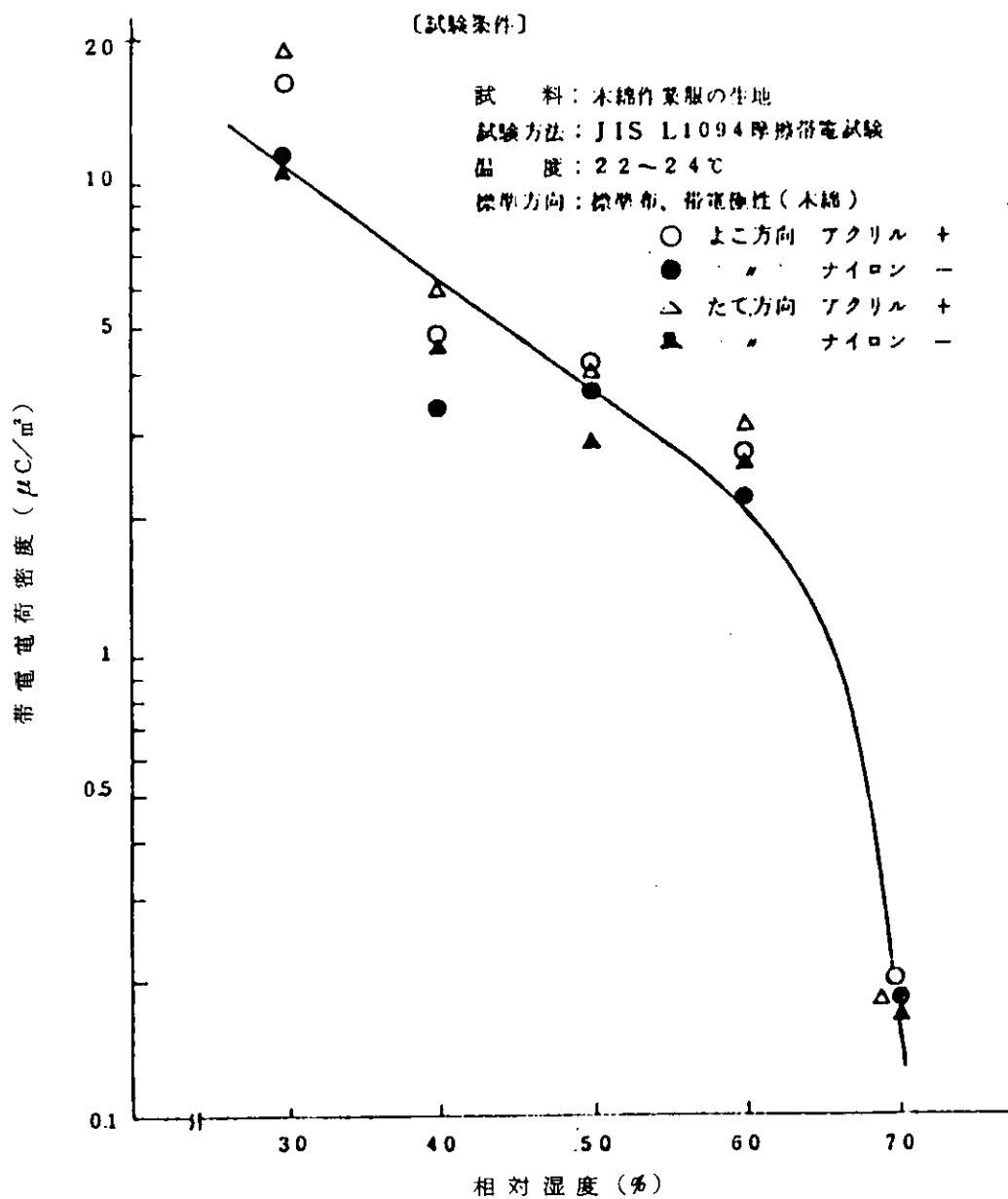


図 1.2.28 木綿の摩擦帯電量の湿度依存性  
 (産安研にて測定)

また、防爆作業衣、無じん衣、カーペット等の繊維として導電性繊維の開発が進められている。これは繊維の表面あるいは中心部に導電性を与えるための特殊な処理を施したものである。繊維の径は数乃至数十  $\mu\text{m}$  で電気抵抗は  $10^5 \sim 10^6 \Omega \cdot \text{m}$  程度である。<sup>19)</sup>

#### (4) 湿度の制御

湿度を大にすれば静電気の緩和は早くなつて電位の上昇を防止できる。その効果は今まで述べてきたように極めて大きい。さらに例をあげると図 1.2.29 のようである。接地とともに比較的簡単に効果のある帯電防止法である。

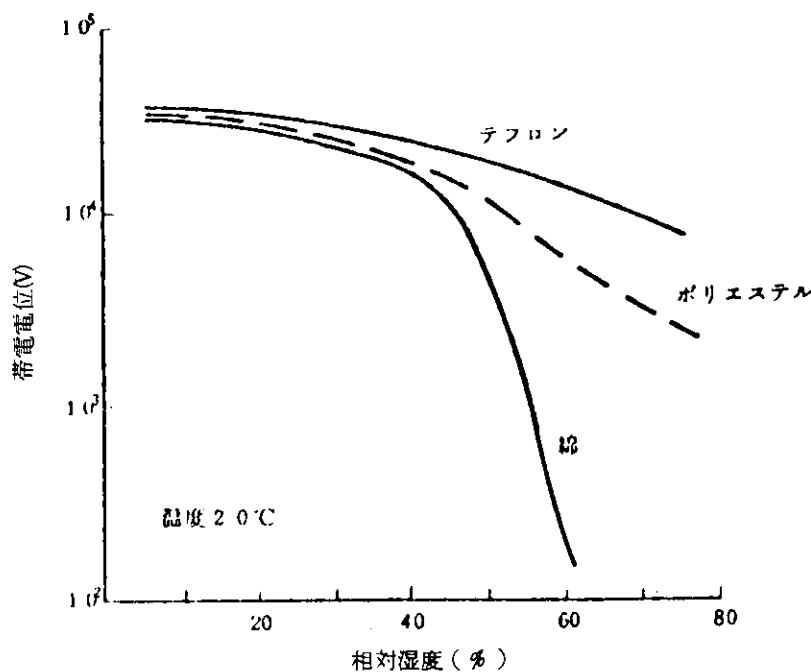


図1.2.29 相対湿度と帯電電位の一例

##### (5) 流送における帯電防止

最後に流送における帯電防止法を前述の項目よりまとめてみる。

- 1) 輸送量は多量にした方がよい。
- 2) 粒度は大きい方がよい
- 3) 輸送物の表面積を導電性にする。
- 4) 輸送管は金属がよい。
- 5) 輸送管は屈曲部やしづり部をできるだけ少なくする。
- 6) 流送速度はできるだけ低くする。
- 7) 輪送に空気を用いる場合は相対湿度をできるだけ大きくする。
- 8) 作業員はできるだけ帯電防止靴や衣類を使用する。
- 9) 作業場の雰囲気の相対湿度を大きくする。
- 10) 接地をする。
- 11) 不導体と思われてきたプラスチック製品は導電性加工を施したもの要用いる。

このほか、最近は粉粒体の空気輸送における高速除電器の開発も進められているので<sup>15)</sup>極めて危険な場合や他の対策を施行できない場合などにはこのような積極的な対策も必要となるであろう。

## 引　用　文　献

- 1) 正田　強：火災、爆発危険性の測定法，2，p.18(1978)
- 2) H.B.Dixon and H.F.Coward : Proc. Chem. Soc.,Lond., 26, p.67(1909)
- 3) 波止　薰：ガス、炭じん爆発，1, p. 17(1966)
- 4) 山田　穰：鉱山保安ハンドブック，1, p. 75(1958)
- 5) 波止　薰：ガス、炭じん爆発，1, p. 106(1966)
- 6) 正田　強：火災、爆発危険性の測定法，2，p. 27(1978)
- 7) 石浜　涉外：第11回安全工学シンポジウム講演集，p. 101(1981)
- 8) Donald Rae : Eleventh Int.Conf. of Directors of Safty in Mines Research, C18(1963)
- 9) 厚見利作：爆発予防論 p. 101(1940)
- 10) 阿部与外：日本鉱業会誌，83, 953, p. 1077(1967)
- 11) 木下重数, 外：日本鉱業会誌，85, 973, p. 327(1969)
- 12) H.Titman : Trans. of the Inst. of Mining Eng., 115, p. 536
- 13) W.G.Thomas : Colliery Engineering, p. 329, Aug. (1962), p. 377, Sep.(1962)
- 14) JIS C 0901 : 炭鉱用電気機器の防爆構造, p. 49(1978)
- 15) 増田内一：最近の静電気工学，変圧ガス保安協会，(1974)
- 16) 斎藤与四郎：坑内用各種器材の静電気発生とその予防に関する研究，探鉱と保安，Vol. 17, No. 6, (1971)
- 17) 通産省立地公害局, 静電気対策部会編：静電気対策とその技術解析（石炭鉱山）(1981)
- 18) 上滝具貞, 他：空気輸送における静電気現象の研究紹介, 粉体工学研究会誌, Vol. 12, No. 3, No. 6, (1975)
- 19) 上田　実：静電気対策の現状, 安全工学, Vol. 20, No. 6(1981)
- 20) 荷福正治：可燃性粉体の帯電と災害対策, 安全工学, Vol. 20, No. 6(1981)
- 21) 増井貞明, 他：空気輸送における粉体の帯電性, 静電気学会学術講演会講演要旨集
- 22) 赤崎正則：高電圧工学における今後の課題, 静電気学会学術講演会講演要旨集
- 23) 静電気学会編：静電気ハンドブック, オーム社(1981)
- 24) 増田弘昭, 他：曲管部における固気2相流の発生電流, 化学工学論文集, 3, (1977)
- 25) 増田弘昭, 他：管内固気2相流における帯電実験粉体工学研究会誌, Vol. 10, No. 3 (1973)
- 26) P.Boshung 他 : Methods for Investigating the Electrostatic Behaviour of Powders. Journal of Electrostatics, Vol.8, No. 2, 3, (1980)
- 27) 増井典明, 他：空気輸送における粉体の帯電性(II), 静電気学会学術講演会講演要旨集
- 28) 東　猛, 他：ガス吸引チューブに混入する粉じんの静電気災害の危険性, 火災, Vol. 28, No. 2 (1978)
- 29) 増田内一, 他：粉粒体の空気輸送における变速除電について, 静電気学会学術講演会講演要旨集。

## 4. ガス・炭じん爆発防止対策

### 4.1 ガス爆発防止対策

#### 4.1.1 爆発現象の性状から考えられる対策

アセチレンや水素と塩素混合ガスのように酸素がなくとも爆発する例はあるが、メタンまたは石炭ガスを対象とした場合は爆発を一般の酸化反応としてとらえればよい。そこで酸化条件の完全除去または抑制が可能な方法について、以下に述べる。

##### (1) 着火位置、ガス温度および圧力

可燃性ガスに着火するときは上方着火（火炎の進行は下方）と下方着火（火炎の進行は上方）では、着火濃度範囲がかなり異なる。<sup>1)</sup> すなわち、下方着火ではその濃度範囲は広がり、上方着火では狭くなり、水平着火ではその中間である。ガス温度が上れば、爆発の上下限濃度範囲は広がることは周知の通りである。また開放型よりも密閉型爆発試験器を用いた爆発試験の方が、下限濃度が低いという事実がある。ガス温度や圧力を異常に高めるような状態が出現しないような処置も必要である。

##### (2) 着火源の質と形状

着火温度は、ガス濃度によって若干異なるが、リボン状発熱体式着火源を用いた爆発試験では、かなり明瞭な差が現われる（図1.2.30）。<sup>2)</sup> これは要するにガスの着火・爆発現象が、熱エネルギーの与え方や、付与される熱エネルギーの大小に関係することの証左である。

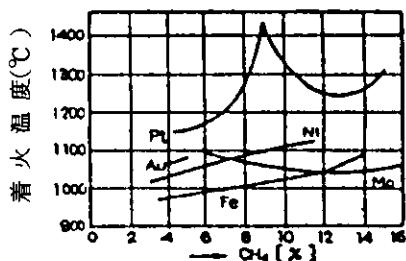


図1.2.30 [メタン-空気] の着火温度  
と加熱金属の種類

図1.2.30によれば白金を用いた場合が最も着火温度が高く、鉄が最も低い。しかし石綿に白金微粉を付着させた発熱体では、ほぼ室温で着火に至らしめることができる。<sup>2)</sup> つまり白金発熱体をこのようないくつかの状態で使用すると比表面積が大きくなり、触媒としての作用が働くからである。図中では鉄による着火温度が最低を示しているが、これは触媒作用によるものではなく、金属発熱体としては最も比表面積が大きいからと思われる。発火危険のある部位の材質、形状にも考慮の要がある。

##### (3) 狹げき構造と火炎温度

防爆電気機器のうち耐圧防爆構造の基礎となるものは、霧囲気ガスに火炎逸走を生ぜしめないスキの値であり、この値をセーフ・ギャップと呼んでいる。<sup>3)</sup> 火炎逸走限界試験（狭げきの奥行2.5mm、内径1.8cm、深さ1.5cmの円筒使用）では、9.5%メタンに対する狭げき間隔上限は1.15mmである。しかし石炭ガス（H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>の各容積比が4.1、2.0、1.0、2.25、及び5.1、1.8、1.4、2.12、の2種）に対しては、それぞれ0.75mm及び0.60mmに低下していることは注目すべきであろう。着火により発生した火炎の温度を着火温度以下に、または着火エネルギー以下に低下させる方法としては、この狭げき構造方式のほかに、エキスピンドメタル方式があり<sup>4)</sup> メタンに対する効果が認められている。

#### 4.1.2 電気火花の着火防止対策

一般に電気火花と称せられるものを、放電機構により分類すると、①リレー接点、電気接点、電動機の整流子などに生じる微小火花、②回路の開閉、配線の断線、接触不良、ショートなどに際して生じる極短時間の弧光（アーチ）放電、③高電位帯電の結果、周囲の空気が一部絶縁破壊して生じるコロナ放電や火花放電、（これらが生じるに必要な電圧は400V以上といわれている）、の3種になる。なお③には静電帯電体からの放電も含まれるが、この場合の帯電電圧は1,000～10,000Vである。電気火花による放電のエネルギーは一般に小さいから、炭じん等の可燃性粉じんよりも着火エネルギーの小さな可燃性ガスや引火性蒸気の着火源となることが多い。換言すれば一般工場はもちろん炭鉱においても電気火花の発生頻度は高く、従って可燃性ガスの着火源となる危険確率が最も大きいものの1つになり得る。

爆発性ガスの存在する場所または存在するおそれのある場所で電気工作物を設置または使用する場合は、その爆発性ガスの性状に応じた防爆構造の電気機器を用いなければならない。防爆構造は、構造の種類、<sup>5)</sup>爆発性ガスの爆発等級および発火度によって表1.2.14のように分けられる。

表1.2.14 防爆構造の分類

区分		記号
防爆構造の種類	耐圧防爆構造	d
	油入防爆構造	o
	内圧防爆構造	f
	安全増防爆構造	e
	本質安全防爆構造	i
	特殊防爆構造	s
爆発等級	爆発等級 1	1
	爆発等級 2	2
	爆発等級 3	{ 3 a 3 b 3 c 3 n }
発火度	発火度 G 1.	G 1
	発火度 G 2	G 2
	発火度 G 3	G 3
	発火度 G 4	G 4
	発火度 G 5	G 5
	発火度 G 6	G 6

爆発等級は火炎逸走限界の値に従って、表1.2.15のように分類され、発火度は爆発性ガスの発火温度（着火点）に従って表1.2.16のように分類されている。

表 1.2.1.5 爆発等級の分類

爆発等級	スキの奥行 25 mmにおいて火炎逸走を生ずるスキの最小値
1	0.6 mmを超えるもの
2	0.4 mmを超え, 0.6 mm以下のもの
3	0.4 mm以下のもの

表 1.2.1.6 発火度の分類

発火度	発火温度
G 1	450°Cを超えるもの
G 2	300°Cを超え, 450°C以下のもの
G 3	200°Cを超え, 300°C以下のもの
G 4	135°Cを超え, 200°C以下のもの
G 5	100°Cを超え, 125°C以下のもの
G 6	85°Cを超え, 100°C以下のもの

メタンに対しては爆発等級 1, 発火度 G 1 に適する防爆構造が必要である。なお、石炭ガスに対しては爆発等級 2, 発火度 G 1 に適合する必要がある。

防爆構造は、それぞれ次のような構造的特徴と使用条件を有する。

#### (1) 耐圧防爆構造

全閉構造で、容器内部で爆発性ガスの爆発が起こった場合に、容器がその圧力に耐え、かつ、外部の爆発性ガスに着火するおそれのない構造である。

電気機器において、常時運転中の火花、アークまたは着火源となるような高温を発生するおそれのある部分は、耐圧防爆構造、油入防爆構造または内圧防爆構造のいずれかによらなければならないとされている。これらのうち内圧防爆構造は規格に定められているだけで一般には使用されず、油入防爆構造は開閉器など特定の電気機器のみに用いられ、一般には耐圧防爆構造が用いられる。防爆構造の使用に当っては電気設備防爆指針<sup>5)</sup>にそった細心の注意が必要である。

#### (2) 油入防爆構造

電気機器の火花またはアークを発生する部分を油中に納め、油面上に存在する爆発性ガスに着火するおそれのないようにした構造である。油面から火花発生部までは最小 10 mm の深さとする。開閉器、制動器、変圧器、液体抵抗器などの防爆構造に用いられる。開閉器用は、開閉の際に生ずるアークにより絶縁油が分解し、水素などの可燃性ガスを発生しやすいので、ガス抜き孔を設けなければならない。

#### (3) 内圧防爆構造

容器内部に保護気体（新鮮な空気またはガス）を圧入することによって、爆発性ガスが侵入するのを防止した構造である。内圧の低下を知らせる自動警報装置、または作動停止システムが必要である。対応ガスに対して耐圧防爆構造の製作が不可能な場合、例えば爆発等級 3、発火度 G 6 に相当する可燃性ガス環境では、この構造にしなければならない。

#### (4) 安全増防爆構造

常時運転中に火花、アークまたは過熱を生じてはならない部分に、これらの発生するのを防止するため、構造上または温度上昇について特に安全度を増加した構造である。部分構造、使用材料、絶縁空間寸法などを厳しくして安全度を高める。しかし本体の破損や故障等を生じた場合は、全く防爆性はなくなるので、保安点検の励行が特に要求される。

#### (5) 本質安全防爆構造

常時運転中および事故時(短絡、地絡、断線など)に発生する火花、アークまたは熱により爆発性ガスに点火しないことが、点火試験、その他によって確認された構造である。

理論的には最も防爆性は大きいことになるが、実際上は、これに接続する回路からの誘導によって、高エネルギー火花が発生することがある。一般に大容量の機器には適用がむずかしく、主として測定計器などに適用される。

#### (6) 特殊防爆構造

(1)～(5)以外の構造で、爆発性ガスの引火を防止できることが、試験その他によって確認された構造である。特殊防爆構造としての使用条件、設置方法などが指定されている場合は、それにしたがって使用しなければならない。

なお、炭鉱用電気機器では以上のほか、狭ぎ防爆構造が認められている。<sup>7)</sup> これは、容器の内外を狭いすき間によって連絡し、容器内部でガスの爆発が起った場合、狭いすき間からガスを噴出させて危険な圧力上昇を防ぐと共に、外部のガスに着火するおそれのない構造である。

#### 4.1.3 静電火花の発生防止

9.5%CH<sub>4</sub>の最小着火エネルギーは0.3mJ程度である。また表1.2.17<sup>8)</sup>は、静電気の帯電電圧と放電エネルギーの関係を示したものであるが、帯電体の静電気容量が200μμFならば、帯電電圧

表1.2.18 静電帯電体の放電エネルギーE(10<sup>-3</sup>Joule)

帯電電圧 (V)	静電容量 C(μμF)				
	10	100	200	300	500
1,000	0.005	0.050	0.100	0.150	0.250
2,000	0.200	0.200	0.400	0.600	1.000
3,000	0.450	0.450	0.900	1.350	2.250
5,000	1.250	1.250	2.500	3.750	6.250
10,000	0.500	5.000	10.000	15.000	25.000

2.000Vにおける放電エネルギーは0.4mJであるから、この範囲で十分に着火危険状態になる。

一方人体の電気容量は、一般に床面と足の裏との間の容量できる。表1.2.18<sup>8)</sup>は靴底の厚さと人体の電気容量との関係である。靴底の厚さは通常10～15mmと考えられるから、平均容量は200

表1.2.18 人体の電気容量と靴底の厚さとの関係

靴底の厚さ (mm)	0.25	0.5	1.1	1.28	4.6	8.9	15.5
人体の電気容量 (μμF)	6,800	2,300	850	190	130	100	75

μμF、すなわちメタン着火に必要な静電気が人体に帯電する可能性は極めて大きい。

いうまでもなく静電気は、絶縁性の高い物同志の摩擦や加圧後の離脱において容易に発生する。エンジン排気中の煤、さく岩粉じん、物体流送時の発生粉じん等はもちろん、降雪にも帯電し、これらが付着した衣服や人体が帯電体となり、放電によって爆薬類が爆発した例もある。<sup>9)</sup>

対策として、①帯電序列の近いものを選ぶ、または帯電序列が反対なものを組合せ、接触電位差を小さくする、②導電性の大きい材料を使う、③絶縁材料はカーボンブラック混入量を増したもの、または

これを主成分とする電導塗料を塗布する,<sup>10)</sup> ④接地する, ⑤帯電危険環境の加湿, などが考えられる。しかしながら①, ②, 及び③の対策では, 物体の表面酸化や状態変化のために低接触電位差や電導性の維持がむづかしくなる場合, ④では電気容量の大きなものの完全除電が困難, といった欠陥もあることに注意すべきである。

⑤の対策は相対湿度を75%以上にすることにより, 物体表面の付着水滴が吸収した炭酸ガスの電導効果を期待するものであるが, 室温よりも対象物体が高温の時は効果がないといわれている。<sup>11)</sup>

ほかに帯電危険環境の不活性ガスによる置換(後述), 空気中にイオンを作り(コロナ放電, アイソトープT<sup>204</sup>などを使用), 帯電体表面荷電を中和させる方法<sup>12)</sup>がある。

#### 4.1.4 不活性ガス置換

不活性ガス置換による燃焼・爆発抑制法の効果は, すでに多くの研究によって, また多くの事例によって立証されている。例えば, Jones, G. W. ほかによるガソリン蒸気の爆発限界における各種不活性ガスの影響や,<sup>13)</sup> 沼野ほかの窒素置換空気中における石炭ガスの爆発限界<sup>14)</sup> などがそれである。

ただし前述2者, および他の実験結果等からの共通的な結論は, ①窒素や炭酸ガスのような不活性ガスでは, 爆発下限界濃度はほとんど変らなく, 図1.2.3.1<sup>13)</sup> のような傾向をとること, ②比熱の大きな不活性ガスの方が, 混入量(置換量)が少なくて済む, ということである。

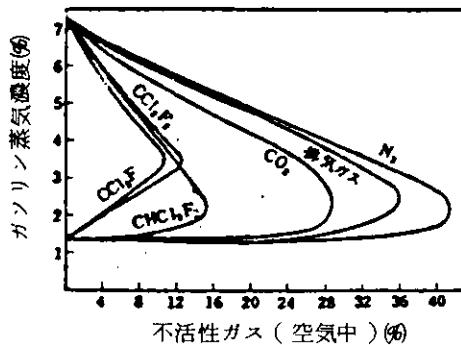


図1.2.3.1 ガソリン蒸気の爆発限界に及ぼす  
不活性ガスの影響

#### [ガス爆発防止対策のまとめ]

メタンによるガス爆発は, 5~15%のメタン, 約18%以上の酸素および必要にして十分な着火源が同時に共存した場合に発生するものであるから, ガス爆発を防止するためにはこの3者が共存しないように設備および作業上注意する必要がある。

石炭焚き船において, 石炭に起因するメタンが存在する可能性のあるのは, コール・バンカー, ディリー・サービス・ホッパーなどである。このような箇所には適切なガス検知装置を設け, メタンおよび酸素の濃度計測を行うのがよい。また, 関連する危険場所は火気禁止区域とし, 使用する電気機器は防爆構造とするなどの注意が必要である。

## 4.2 炭じん爆発防止対策

### (1) 粒度の低下と浮遊性の抑制

炭じんは微細なものほど着火し易い。その反面, 微粉の共通的性質としての凝集性が高まり, 10 μm以下の微粒子は凝集して見掛け粒径が増大し, 被着火能や浮遊性を減じる。<sup>15)</sup> また自然酸化の速度が早く, 爆発の酸化反応は生じ難くなる。しかし微粉が生成されるような条件では, その粒子に静電気が帯電し易いということも併せて考慮する必要があろう。

採炭作業では炭壁注水や散水（この項については後述する）による採炭時の発じん防止、及び堆積炭じんの再飛散防止を計っているが、この際、用水に界面活性剤を添加すると、濡れが増し、水の蒸発後でも界面活性剤が炭じんを固着させ、着火温度を高める。<sup>16)</sup>

#### (2) メタンとの共存排除

Nagy, J.<sup>17)</sup> 等によれば、メタンと浮遊炭じんが共存した場合は、メタン量が1%増すごとに、その爆発下限濃度が約20%低下する、としている。

#### (3) 撃発分の除去と不燃物質の添加

工業分析における撃発分が多いものほど着火性は大きい。撃発分が11%以下の炭じんは、実験室的な小型試験器では通常爆発せず、強力な火源（たとえば爆薬）を用いた試験坑道法でも、多少の爆発性を示すにとどまる。

添加し得る不燃物質としては、防爆岩粉（後述する）や水（界面活性剤溶液を含む）のほかに塩、または塩水、重曹、次亜硫酸ソーダ、硼砂等がある。<sup>18)</sup> 特に食塩は、ダイナマイトに添加することにより消炎力が付加され、炭鉱用爆薬に供されている点、また空気中の水分を吸収し、自ら潮解することによって炭じんを湿潤化、固着する（この事に関しては後述する）などの長所がある。しかし水による加湿または湿潤化された石炭は、長期貯炭時に自然発火を助長する恐れもあり、また湿分1%前後の炭じんは、かえって着火温度が低下する<sup>19)</sup> などの悪影響もみられる。

#### (4) 不活性ガスの使用

窒素、炭酸ガス、フロン（F-12）の混合気体による着火性試験<sup>19) 20)</sup> によると、フロンの1%未満混合気では着火温度を950℃以上に（ただし混合比、及び温度の正確な数値は計測不能のため記載されていない）、窒素混合気体は換算酸素濃度で約10%で爆発性火炎を消滅させることができた（着火温度550～600℃の墨青炭）。なお無煙炭は15%O<sub>2</sub>で着火温度は950℃を超えた（20.8%O<sub>2</sub>時の着火温度は800℃）。すなわち既述、ガス爆発防止対策のための不活性ガス置換による効果とほぼ同じ傾向を示した。

#### (5) 炭じん発生危険箇所の加湿と低温維持

炭鉱における炭じん爆発発生の傾向は、坑内が乾燥し易い秋から冬にかけて一般に多い。ただし乾燥期に至ると直ちに発生するというわけではなく、乾燥の履歴、すなわち実効湿度が問題になるようである。また実験的には炭じんの初期温度が高いほど着火温度が低下するから、<sup>21)</sup> 高熱面に堆積した炭じんに再飛散が起り、かつ点火源があるような環境は作ってはならない。発じん環境が加圧下にある場合も同様である。

ただし(3)でも述べたように、不充分な加湿状態を作ることは、同様に注意を要する。

#### (6) 岩粉散布

坑道に堆積した炭じんが再飛散することによって生じる爆発防止に採用されている、最も一般的な方法である。もちろん岩粉は、①不燃性物質であること、②飛散性が大きいこと、③比熱が大きいこと、④炭じんに対する付着性が良いこと、⑤じん肺予防の観点から、遊離けい酸分が少ないと、などの条件を備えたものでなければならない。

#### (7) 炭壁注水と散水

炭鉱内の炭層にさく孔された5～20mのボアホールを通じて高圧水（日本では35kgf/cm<sup>2</sup>前後）を1孔当たり300L程度注入しておく炭壁注水法は、爆発性炭じんの発生量を70%以上減少すると<sup>21)</sup> 同時に、炭じんに不燃性物質を添加したことと同様の効果がある。

堆積炭じんや採炭時に発生する炭じんの飛散防止、及び不燃化のために高圧散水（シャワー）を行うこともあるが、炭じんは水に濡れ難く、大量の水を使うと切羽や坑道の状態を悪くすることもあるので、炭壁注水法に勝る爆発防止法とはいひ難い。

#### (8) 吸湿性塩類による方法

岩粉散布の代りに岩塩を散布する方法が、西ドイツの炭鉱では実用化されている。<sup>23)</sup> 塩の持つ消炎効果と、空気中の水分を吸収することによって潮解し、散水したのと同じような状態になる効果を利用したものである。

吸湿性塩類を石灰、界面活性剤等と一緒に練り上げてペースト状とし、炭じんが飛来、堆積し易い坑道に噴射塗布して置くと、炭じんはペースト面に捕集され、そのまま層をなして固着される。この方法は実験的にはその効果が認められたが、<sup>24)</sup> ペーストにより作業性、及び作業環境を悪化させる問題を如何にすべきかについて、決定的解決はなされていない。

#### (9) 粉じん防爆構造の使用

炭じん危険場所に設置する電気機器は粉じん防爆構造のものとし、配線などの電気工事も防じん性のものとしなければならない。<sup>25)</sup>

粉じん防爆構造の電気機器は、内部への粉じんの侵入および外部の粉じんへの着火を防止し、丈夫で、粉じんの堆積が少なく、点検及び補修に便利な構造であり、その使用材料は電気的、機械的、熱的および化学的に十分な抵抗力を有するものでなければならない。粉じん防爆構造は、粉じんの性質および発火度によって分類されている。

#### 〔炭じん爆発防止対策のまとめ〕

炭じん爆発防止対策の多くは炭鉱の坑内で実用化されている方法である。石炭焚き船において実用化しうる方法としては、石炭の貯蔵ないし輸送システムにおいて不活性ガスまたは燃焼廃ガスを使用して酸素を遮断する方法、および炭じん危険場所で電気機器を設置または使用するときは粉じん防爆構造のものとすることである。炭じんは一般にメタンと共存する場合が多いので、ガス・炭じん両者の爆発防止に有効な対策を実施する必要がある。

### 4.3 爆発伝ば防止対策

#### 4.3.1 伝ば防止の原則

ガス、及び炭じん（浮遊炭じん）の一部に着火されると、爆炎は未反応部分へ次々に伝ばしてゆき、爆どうに至る。しかし爆どうに達して爆どう波を生じるためには、いわゆる「助走路」が必要である。この助走路の距離はアセチレンや水素は数mmと極めて短いが、メタンや他の炭化水素類は数mといわれている。<sup>1)</sup> このような状態に至ると爆速は加速され、爆どう波や火炎、及び熱エネルギーは強大になる。すなわち爆発伝ば防止の基本原則の一つは、爆どうまたは爆どう波の生成を抑制することであろう。

火炎の進行路に凹凸があるとガスの攪拌が起り、助走路距離は短くなること、また爆どう波の通過部分は化学反応が完全に終ったわけではないから、密閉構造内では爆どうや爆どう波の反射が生じやすい。このような事からも、爆発危険箇所の構造についての考慮を怠るべきではない。

#### 4.3.2 炭鉱・工場等で実施されている爆発伝ば防止対策

ガス・炭じん爆発はこれを未然に防止して絶対に発生しないようにすべきであることは言うまでもないが、それにも拘らず不幸にして爆発を生ずることがあるかも知れない。このような場合はその初期段階に爆発の伝ばを阻止して、爆発の拡大を防止しなければならない。以下、炭鉱および工場で実施されている爆発伝ば防止対策の例をあげ、今後の船舶における爆発伝ば防止対策に資したい。

#### (1) 岩粉棚及び水棚

岩粉棚は防爆岩粉、または防爆石粉を破れ易い袋につめたものを、炭鉱内の坑道上方に作られた棚にのせておく方法である。爆風（衝撃波）または爆どう波がこの部分を通過すると棚が反転し、岩粉すなわち不燃物が飛散して岩粉雲を形成、これが爆風に後続して来る爆炎の熱エネルギーを吸収して消炎し、爆発の伝ばを阻止する。

水棚は、岩粉の代りに坑道上部に水袋または水箱を設ける方法である。岩粉棚または水棚に積載する岩粉量または水量は、普通坑道で坑道断面積1m<sup>2</sup>当たり0.1m<sup>3</sup>、特別重要な坑道で坑道断面積1m<sup>2</sup>当たり0.4m<sup>3</sup>とされている。<sup>26)</sup>

#### (2) 作動式伝ば防止装置

炭鉱の坑道内に感知器を設け、これが爆圧を感じたとき直ちに、消火剤、水または防爆岩粉などの不燃性物質を爆炎の進行に対向して噴出させて消炎し、その爆発伝ばを阻止する方法が、最近各国で研究されている。<sup>27), 28)</sup> これらの中には雷管または導爆線を利用して、消火粉あるいは防爆岩粉を飛散させるようにしたものがある。<sup>29)</sup>

#### (3) I・E・P・爆発抑制装置

アメリカで開発されたI・E・P・システム( Industrial Explosion Protection System)は、粉じん爆発の発端を感知して、大事に至る前にその初期の爆発を消火抑制して、爆発の伝ば拡大を防止する。<sup>30)</sup> これはプラスチック、農薬、染料、食料、石炭<sup>31)</sup>などの粉碎、篩別、乾燥、貯蔵、輸送などの工程で、粉じん爆発のおそれある箇所に感知器を設け、これが爆発を感じた時は、消火装置が作動して消火剤を噴射して消火すると共に、必要な開放弁の開放、関連機械の運転停止、監視装置の警報および作動表示などを行なうようにしたシステムである。

#### (4) ベントによる方法

一般工場における爆発伝ば防止対策として、最も普遍的に採用され、かつ実際的効果をもたらしている方法である。<sup>32)</sup>

破裂板方式のものは、爆発危険箇所の構造材料よりも圧力に弱い材料を用いたり、強度上、それ以上に弱い材料が使えない場合は、原材料に予め傷をつけ、設定圧力で破裂するようにしたものと2通りある。

ドア方式には、スプリング留め、磁石（永久磁石）留めが考えられる。

設置する場所は爆発危険箇所、またはこれになるべく近接した箇所が有効であることはいうまでもない。またベント比（開放面積／密閉装置容積）については、NFPAでは750m<sup>3</sup>（容積）までは $\frac{1}{9}$ ～ $\frac{1}{16}$ m<sup>-1</sup>、750m<sup>3</sup>以上の大容積または軽量コンクリート造の室では $\frac{1}{18}$ ～ $\frac{1}{24}$ m<sup>-1</sup>、またVD12263は $\frac{1}{10}$ m<sup>-1</sup>をそれぞれ推奨している。

### 4.3.3 爆発伝ば防止対策の問題点

爆発伝ば防止対策における最大の問題点は、爆発規模、及び爆ごう波等の進行方向の予測が極めて困難なことである。

炭鉱の坑道の場合は、すべての部分がいわゆる重要区域であるため、一般工場等のように重点的対策にとどめることができず、従って坑内の開発展開が進むと、それに対応して対策や施設の拡張、拡大が要求される。そのため鉱山保安法では、主要坑道や、切羽に直結する坑道等における岩粉棚、水棚設置の義務付けを行うかわりに、普通坑道は、坑道平均断面1m<sup>2</sup>につき0.3m<sup>3</sup>以上の岩粉を散布して置く手法も認めているが、岩粉飛散性の経年変化を考えれば、必ずしも満足な方法とはいひ難い。またこの手法が一般工場等の爆発伝ば防止対策として、そのまま適用できるものではもちろんない。

しかし坑内にせよ一般工場にせよ、爆発危険箇所の予測については、かなりの確率度をもつて行なうことが可能である。また爆ごう波生成以前にこれを抑制することが伝ば防止対策の第一義と仮定するならば、やはり局所対策、すなわち、比較的場所をとらない作動式伝ば防止装置等の有効利用法を考えるべきであろう。

石炭だき船における爆発伝ば防止装置としては、ベントまたはこれにI・E・P・システムを併用する方法が適当であろうと考えられる。

#### 4.4 爆発被害減少対策

爆発が爆こうに至っても化学反応が完全に終了することはほとんど無い。それゆえ爆発跡ガス中には必ず一酸化炭素が含まれる。

一方、跡ガスは、爆発発生箇所に通気が存在すれば排気側に流れる(火炎や爆こう波は入気側に展開し易い)。しかしながら施設が破壊され、爆発箇所が閉塞状態になれば当然のことながら跡ガスは充満する。

炭鉱坑内においては、爆発危険箇所を通気的に独立分流回路内に置くような坑内構造を、あらかじめとるようにしているが、これは一般工場等においては、防護壁等を用いた施設の孤立化、隔離化に相等する。

ところでメタン、または石炭ガス、あるいは炭じんおよびガス・炭じん爆発の跡ガス対策は、一酸化炭素対策そのものと考えてさしつかえない。

現在炭鉱用COマスクの主流は、ホブカライト触媒方式である。<sup>33)</sup> ホブカライト触媒とは、酸素の存在する常温環境において、一酸化炭素を(燃焼)酸化し、二酸化炭素にするものであつて、マンガン、コバルト、銅、銀などの酸化物を混合し、通常粒状としてマスクに収納されている。しかしこの触媒渦過式マスクでは、①ガスが湿っていると活性が落ちること、②酸化反応の際に温度が上り、特に0.5%CO以上になると水素や炭化水素類まで燃焼するので高温になり呼吸器損傷を起こすこと、③酸欠状態(1.5~1.6%O<sub>2</sub>以下)では使用できない、などの欠点がある。

限定された広い空間内の大爆発では、一酸化炭素濃度が異常に高く、かつ酸素濃度が10%以下になるような事態はしばしば出現する。このような場合、前述の触媒渦過式マスクは役に立たないので、最近では酸素発生式マスク<sup>34)</sup>の研究が行われている。

一酸化炭素と共に危険な現象は火災である。防熱服、または耐熱服の着用方法、あるいは非常用シャワー設備(特に避難行動中の水浴用として)などの設置についても、あらかじめ考慮すべきである。

船舶においては、爆発の跡ガスから生命を守るために、COマスクを着用して退避するというような場合は起りえないものと考えられる。しかし、罹災者の救護、火災の消火、爆発跡ガスの排除その他の応急作業のため有毒ガスの充満した箇所に立入らなければならない場合も考えられる。したがって、相当数の空気呼吸器<sup>35)</sup>を備え、いつでも使用できるように整備しておくことが望ましい。なお、酸素呼吸器は所定の救護訓練を受けた資格ある人でないと使用できない。

#### 引　用　文　獻

- 1) 後藤廉平：安全工学 1 No. 1 11 (1962), 及び Coward H. F., Jones G. W.; "Limits of Flammability of Gas and Vapors, Bureau of Mines Bull. (1952)
- 2) 山北逸郎：物理化学の進歩, 19 69, 85, 98 (1945)
- 3) 鶴見平三郎：セーフ・ギャップについて 産業安全研究所安全資料 (1974)
- 4) 松隈喜總, 青柳博, 池田武弘：安全工学 9 212 (1970)
- 5) 労働省産業安全研究所：工場電気設備防爆指針(ガス蒸気防爆 1979)
- 6) JIS C 0903 一般用電気機器の防爆構造通則 (1975),  
JIS C 0905 電力用電気機器の防爆構造 (1975)
- 7) JIS C 0903 炭鉱用電気機器の防爆構造 (1975)
- 8) 北川徹三：応用物理, 24 No. 10, 435 (1955)  
Gest, P. G.; U. S. Bureau of Mines Bull., No. 368 (1939).  
及び Gest, P. G., Sikora, V. W., Lewis, B.; U. S. Bureau of Mines, Bull., No. 520 (1953)

- 9) 露天採掘の手順と安全編集委員会：露天掘 27(1980),  
通商産業省立地公害局：静電気と安全な発破作業(1975), 他
- 10) N. F. P. A. : No. 77 " Static Electricity " (1953)
- 11) 北川徹三：化学安全工学, 128(1970)
- 12) " Static Electrification ", Brit. J. App. Phys., Suppl. No. 2(1953)
- 13) Jones G. W., Gilliland W. R. : U. S. Bureau of Mines Rep. Inv. No. 3871(1946)
- 14) 沼野雄志, 北川徹三：工化 16 517(1958),  
北川徹三：化学安全工学 132(1970)
- 15) 房村信雄：炭塵爆発 39(1952)
- 16) 松隈喜総, 田尻昭英：採鉱と保安 99 439(1963)ほか
- 17) Nagy, J., Portman, W. M. : Explosibility of Coal dust in an atmosphere  
Containing a low percentage of methan, U. S. Bureau of Mines Rep. Inv.  
No. 5815(1961)
- 18) Greenwald, H. P., Howarth, H. C., Hartmann, I. : Min. J., Sep., 21(1940)
- 19) 房村信雄, 岩崎孝：安全工学, 8 No. 3 157(1969)
- 20) Fusamura, N., Iwasaki, T. : 早稲田大学理工学研究所報告, 49.10(1970)
- 21) 房村信雄：安全工学 7 No. 3, 162(1968)
- 22) Dorsett, H. G. : Laboratory equipment and test procedures for evaluating  
explosivity of dust, U. S. Bureau of Mines Rep. Inv. No. 5624(1960)
- 23) 炭鉱保安情報, No. 164, 1(1964), Krüpe, E. : Glükauf 日本版, 1/8, 411(1952)
- 24) 房村信雄, 岩崎孝, 関口英明：安全工学, 9 No. 3 152(1970)
- 25) 労働省産業安全研究所：工場電気設備防爆指針(粉じん防爆 1976)
- 26) 石炭鉱山保安規則：第146条～第148条
- 27) Sasaki, K., et al ; Hempe1, D., et al ; Scholl, E. W., et al ; ほか  
Rep. 12th Int. Conf. of Mining Safety Res. Est. (1967)
- 28) 梅津実：安全工学 14 No. 4, P. 281(1975)
- 29) 安全工学技術シリーズ編集委員会編：ほこりー粉じんーの科学(1981)
- 30) 那須貴司：安全工学 14 No. 4, P. 275(1975)
- 31) John. P. Coll : The Determination of the Explosive  
Characteristics and the Explosion Suppression of Standard Pittsburgh  
Coal Dust, Fenwall Inc. (1977)
- 32) 松田東栄, 内藤道夫：粉じん爆発に対する圧力放散設備, 産業安全研究所安全資料  
(1975)
- 33) JIS M 7611 一酸化炭素用自己救命器 (1977)
- 34) JIS M 7651 酸素発生式自己救命器 (1976) : JIS T 8156  
酸素発生形循環式酸素呼吸器(クロレートキャンドル方式) (1981)
- 35) JIS T 8155 空気呼吸器 (1978)

## ま　と　め

炭鉱および石炭専用船における経験に基づいて考察すると、石炭焚き船で考えられる石炭に由来する爆発事故は、石炭から発生して停滯したメタンが何らかの着火源によって着火爆発するガス爆発を主とし、またはこの種のガス爆発によって堆積炭じんが誘爆する炭じん爆発であろう。もちろん、石炭輸送システム内の高濃度炭じんが、静電気その他の着火源で着火して炭じん爆発を発生する可能性も絶無ではないが、ガス爆発の可能性に比較すればその可能性は少なく、また、ガス爆発の可能性にしても、炭鉱現場に比較すれば遙かに少ないものと考えられる。しかし、ガス・炭じんの防爆対策については万全を期すべきである。石炭焚き船におけるガス・炭じんの爆発防止に関する基礎的問題と実際的指針については、本章の各節において述べたとおりであるが、主な点を要約すれば次のとおりである。

- (1) コール・パンカ、ディリー・サービス・ホッパなどの空間に、危険状態のメタンを停滯させないように配慮すること。ここで、危険状態のメタンとは、メタンの燃焼を支えるのに十分な濃度の酸素の存在のもとで、爆発範囲、またはそれに近い濃度のメタンをいう。
- (2) コール・パンカからディリー・サービス・ホッパを経てボイラに至る石炭輸送システムの周辺で炭じんが飛散集積する場所があるときは、その飛散量をできるだけ少なくするよう努め、かつ、船内環境に堆積した炭じんは毎日掃除すること。
- (3) 上記の石炭輸送システム内外および周辺における着火源の管理を厳重に行うこと。特にシステム内外における石炭の自然発火および静電気の帯電防止、温度管理、ならびにシステムからガス・炭じんが拡散し、または拡散するおそれがある範囲は火気禁止区域とし、電気機器を使用するときは防爆型のものとするなどの注意が必要である。
- (4) 上記の石炭輸送システムの適切な箇所に、メタン、酸素、一酸化炭素などのセンサを設け、中央監視室でこれらのガス状態の連続監視を行うこと。なお、これらの監視システムは自然発火対策の計測監視と併せて実施することが望ましい。また、定置型ガス検知装置のほか、携帯型の可燃性ガス検定器、酸素計なども一式常備しておくことが望ましい。
- (5) 上記の石炭輸送システムの適切な箇所に、必要に応じてベントまたは爆発制御装置を設け、万が一にもガス・炭じん爆発が発生したとしても、その被害を最小限度にとどめることができるように配慮しておくことが望ましい。

### 第3章 ストーカ燃焼方式の機関プラントの安全性確保 のための調査研究

#### まえがき

本調査研究の対象ボイラの形式としては、当面最も確実であり世界的にも近代的な船用石炭だきボイラと考えられるスプレッダストーカ型ボイラを選定した。

また対象船種推進プラントは 130,000 DWT バルクキャリアを対象船とし 19,000 PS × 90 rpm 程度のエコノマイザ方式非再熱蒸気サイクルの機関プラントを搭載するものとして機関プラントの安全性確保の観点から

- ① ボイラ数と補助油だき容量
- ② ボイラ故障時の補助推進設備
- ③ 給炭及び灰処理システムの二重性の範囲
- ④ 石炭だきボイラの動特性の解析
- ⑤ 余剰蒸気ダンプシステム

の 5 つのテーマをとりあげ、調査研究を行うこととした。

1. ボイラプラントの構成では、上記①②③の 3 つのテーマをとりあげ、プラントの冗長性・信頼性の観点からみたボイラプラントのあり方を調査するため、各船級協会規則における制約についての比較調査、各社試設計船における計画案のアンケート調査及び過去の石炭だきボイラの損傷例の調査を行い、総合的な調査検討を行った。
2. 石炭だきボイラの動特性解析プログラムでは、ボイラの動特性解析プログラムを作成し、船の操船上、安全上検討を要するスプレッダストーカ部と燃焼ガス系並びにボイラ蒸気・水系について、オープンループに限定して応答特性の解析を行った。
3. 余剰蒸気ダンプシステムでは、低負荷域又は急激な負荷変動時に発生する余剰蒸気を処理する余剰蒸気ダンプシステムのあり方について、造船所とメーカーへのアンケートを含め総合的な調査検討を行った。

## 1. ボイラープラントの構成

### 1.1 船級協会規則の調査

ボイラ数と補助油だき容量、ボイラ故障時の補助推進設備、給炭及び灰処理システムの二重性範囲に関する設計指針策定の一助とするため、各船級協会の規則、指針を調査した。

調査対象としたルールは以下の通りである。

NK : 石炭焚き船の設備に関する検査要領(昭和56年)

( 英文版 GUIDANCE FOR THE SURVEY AND CONSTRUCTION OF  
COAL BURNING INSTALLATIONS IN SHIPS )

LR : GUIDANCE NOTES FOR THE BURNING OF COAL IN SHIPS BOILERS 1980

NV : ARRANGEMENTS FOR COAL FIRED BOILERS TENTATIVE RULES  
( JAN. 1981, PART4 CHAPTER 7 OF RULES FOR CLASSIFICATION  
OF STEEL SHIPS )

AB : GUIDE FOR SHIPS BURNING COAL 1980 (Preliminary)

なお、BVについては問合せの結果、当分の間石炭だき船に関する指針類は発行されないことが明らかとなつたので今回の調査対象からはずした。

上記各ルール(ガイド)の調査結果は以下の通りである。

#### (1) ボイラ数について

各船級とも原則としてボイラを2缶(以上)設けることを要求しており、1缶方式が許される場合の条件に若干の相違があるだけである。

1缶方式とする場合の条件は次の通りである。

NK ; 主ボイラが損傷した場合でも航海に支障のない速力で船舶を推進できる非常用推進設備を備えること。(石炭焚き船検査要領2.1.3項)

LR ; a single main boiler を有するターピン船は、主ボイラ故障時に非常推進を可能とする手段(means)を備えること。(ルール本文 5.3.1項)

NV ; Ch. 1 Sec. 3 C400 に記載の critical reliability に対する要求を満足するか、少なくとも 7 knots の船速を与える非常推進のための十分な準備が行なわれていること。(石炭だき船ルール D201項)

AB ; 「いかなる動的機器の故障によっても 50% 以上の蒸気量を確保できること」という single failure principle を満足する燃焼装置(burning equipment)(draft fansを含む)及び灰処理システムが a boiler に設けられていること。(石炭だき船ガイド 4.0項)

ここで注意を要するのはNVの critical reliability に関する記述とABの要求である。

NVの信頼性解析に関する取扱いは、次年度検討することとし、ここではAB要求の他ルールとの相違を述べる。

NK, LR 及び信頼性解析を行なわない場合のNVは、当然のことながら主ボイラ故障時には主ボイラを使用しない非常推進設備を要求しているように解釈される。具体例でいえば、補助ボイラや電気推進設備等を設けることを要求しているものと考えられる。

これに対しABは主ボイラの故障とはグレート、スプレッダ、ボイラ関係送風機等の動的部分の故障を意味しているものと思われる。したがって例えば 50% 以上の蒸発量を確保する重油バーナを装備し、FDL等の動的機器が二重に設けられ、かつこれらの機器が重油だき時の所要性能を満足するよう計画

されていれば補助ボイラその他の主ボイラ以外の独立した非常用推進装置は不要と解釈される。

もちろん、この相違は表現、解釈上の問題もあり、また実際の承認段階では種々交渉の余地もあると思われるで大きなものではない。しかし1缶方式に対してA Bと他の船級協会との間で若干のニュアンスの違いがあることには注意を払っておく必要がある。

なお、これも表現上の問題であるが、N Vでは前記条件が満たされた場合でも無条件に1缶(又は1缶半)方式が認められるのではなく"特別の考慮が払われる(Special consideration will be to single boiler installations…)"ということであり、N Vとしてはあくまで2缶方式を基本としていることを付記しておく。

## (2) 給炭及び灰処理設備の二重性範囲について

各ルールとも2缶方式を原則としている関係上、石炭庫、ディリーサービスホッパを含む運炭・給炭設備及び灰処理設備についても原則として二重性を持たせるよう要求している点で一致している。しかし細部では若干の相違があるので以下に各ルールの特徴を述べる。

N K ; 航海に支障のない十分な容量を有する補助燃焼装置を備える場合には、石炭庫は1区画として良い。また1缶方式の場合の給炭装置も一重でよい。

。2缶方式の船であっても十分な供給容量を有する給炭ホッパは1個としてよい。

。集灰器、フライアッシュホッパ、灰水分離器、灰貯蔵タンク、送灰管等の各設備は、生成する灰の量に対して十分な余裕をもつ容量とすれば1個としてよい。

L R ; 推進及び船の安全な運航のための基本的サービスに必要な十分な量の蒸気を発生する補助燃焼装置(alternative means of firing)を有する場合は給炭システムを一重としてよい。

。ディリーサービスホッパはフルパワーで12時間分の容量を有することが勧告されている。

。空気又は水による灰処理システムを採用する場合は搬送システムを共通(1本)としてよい。  
但し、空気又は水は少なくとも2つ以上の独立した手段により供給されること。

N V ; 自然発火防止対策がとられるか又は石炭を燃やさずに7 knots以上 の船速を与える推進出力が得られるならば石炭庫は1個で良い。

。運炭及び灰処理システムは、いかなる動的機器の单一故障によっても蒸気発生が妨げられないよう冗長性をもって計画されること。

A B ; いかなる動的機器の单一故障又は1区画のパンカ火災によっても50%以上の蒸発量が確保されること。

これらの記述より、各ルールとも給炭、灰処理装置のうちホッパ、タンク類及び灰移送管のような静的機器に対しては必ずしも二重性を要求せず、動的機器に対して二重性を要求しているといえる。

また石炭庫に関しては、A Bが明確ではないが他のルールからは石炭以外の補助燃焼装置を備える場合には1個としてよいといえそうである。

## (3) 補助油だき容量及び非常推進出力について

### (a) 補助油だき容量

ルール上は補助燃焼装置という表現が使用されており、必ずしも油に限定されていないが、現実的には油以外の燃料は考えにくいので、ルールでいう補助燃焼装置をここでは補助油だき装置と読み換えるものとする。

補助油だき容量に関する記述は各ルールにあるが、いずれも石炭庫や給炭装置を二重化しない場合、あるいは1缶方式とする場合に関するものである。

補助油だき容量に関する定量的な規定はA Bのみで、(1)で述べた通り石炭だき時の50%以上を要求している。他のルールは定量的な表現をしていないが、いずれも船の安全な航行に必要な蒸気を確保

できる容量を最低限の要求としている。

一般的には次に述べる非常推進出力に相当する蒸発量に、通常の居住区船体部サービスに必要な蒸気量を加えたものを補助油だき容量とすればよいのではないと思われる。

一方、ボイラをはじめ給炭、灰処理設備も全て二重化したプラントを有する船が、港内での公害対策用として補助油だき装置を備える場合も考えられるが、この時の油だき容量はルールの対象外であり、ユーザーの要求に応じて自由に設定してよい。

#### (b) 非常推進出力

非常用推進出力についてはNKが「航海に支障のない速力で船舶を推進できる」出力、NVが「少なくとも7 knotsの船速を与える」出力を要求している。LRは具体的な記述がなく、ABは1缶方式とする場合の補助燃焼装置に対して「船の推進と安全、並びに積荷の保護のために必要な」蒸発量として50%以上を要求している。

これらの記述を総合すると、NV以外が要求する非常推進出力とは「船が安全に航行できる船速としては、本来は個々の船に対して設定されるべきものではあるが一般的には「船が利く船速」と考えればよいといえよう。もちろん、この非常推進出力は推進方式の相違によって左右されるものではない。

## 1.2 ボイラプラント構成に関するアンケート調査

### 1.2.1 調査の目的

石炭だき船における前述3つのテーマに関するボイラプラント構成の設計指針を策定するための一助として各社で計画されている試設計船の設計思想をアンケートにより調査した。

### 1.2.2 アンケート項目

ストーカ燃焼方式の機関プラントの安全性確保の観点から石炭だき船として考慮すべき信頼性及び冗長性を幅広く調査するため1.対象船の概要 2.ボイラ構成と非常推進装置 3.給炭システム 4.灰処理システムに分け計約100項目につき調査し、国内の7造船会社を調査対象とした。

### 1.2.3 アンケート調査

アンケート調査の要約を以下に述べる。なお、アンケート調査とりまとめ結果の原紙は資料1.3.2「ボイラプラント構成に関するアンケート調査結果」として(社)日本造船研究協会事務局が保管している。

#### (1) ボイラ数と補助油だき容量

表1.3.2に示す如く各社共に2缶方式を採用しており、

アンケート結果は

2缶方式	石炭専焼ボイラ	3社
	補助重油燃焼装置付	4社

という結果であった。

1缶半方式・1缶方式を採用せず、2缶方式を採用しているのは1缶故障時にも1缶分の蒸発量を確保でき、また2缶同一型式同一容量ボイラを使用できるという操作取扱面での容易性を重視した油だき2缶方式の考え方及び各船級協会規則が2缶方式を原則としていることによるものと考えられる。

2缶方式でも石炭専焼ボイラ2缶を採用しているのは代替エネルギーとしての石炭のみを使用し、重油の使用を極力抑えること、及び補助油だき燃焼装置を設けることによるプラント及び制御系の複雑化をさけるためである。

これに対し2缶方式を採用し、なおかつ補助重油燃焼装置を有しているのは出入港停泊中等の公害規制のきびしい海域内では石炭だきから重油だきに切換えることにより対処すること及び石炭燃焼設備・給炭・灰処理設備等の石炭関連設備の故障時にも重油だきに切換えうることを目的としている。

この場合の補助油だき装置の容量についてのアンケート結果は、最大蒸発量の30～40%であるが、1.1の船級協会規則の調査（1.1.(3)補助油だき容量及び非常推進出力）でのべた如くルール上の要求ではなく、船主と打合せにより設定してよいものである。

#### (2) ボイラ故障時の非常推進設備

主ボイラ故障時の非常推進方法及び補助油だき容量に関するアンケート結果は、

主ボイラ型式	非常推進方法	補助油だき容量	
石炭専焼	残った1缶で航走	石炭専焼故補助油だき装置は設けない	3社
補助重油燃焼装置付	ボイラ全体使用不能時 残った1缶で航走	非常用推進出力以上 ～常用蒸発量	3社
	石炭燃焼装置のみ故障時 残った1缶石炭／油だき		
	1缶石炭 + 1缶油だき		1社

であり、主ボイラ故障時の非常推進方法としては石炭専焼2缶方式、補助重油燃焼装置付石炭だきボイラ2缶方式いずれの場合も、残った1缶で航走するのを原則としている。

しかし補助重油燃焼装置付石炭だきボイラの場合で石炭燃焼装置のみ故障したときには、残った1缶で航走する場合と故障したボイラを油だきに切換える場合の2ケースが考えられる。

また主ボイラ故障時の非常推進設備能力としての必要出力及び航続距離に関するアンケート結果は、

主ボイラ型式	必要出力	航続距離	
石炭専焼	1缶航走出力	片缶航走故両缶航走時より長い	2社
補助重油燃焼装置付	7ノット又は安全操船出力以上	最寄港まで(1/2片航)	5社

であり、2缶方式の場合のボイラ故障時の非常推進設備に関する推進出力及び航続距離に関する考え方は次の通りである。

##### (a) 石炭専焼2缶方式

この場合には健全な1缶で航走することになり、推進出力は常用蒸発量の1/2に相当する出力即ち船の全出力の約40%が得られ、航続距離についても1缶が生きている限り両缶航走時以上の航続距離となり、安全操船出力以上が得られ非常航走のための航続距離は十分得られる。

##### (b) 補助重油燃焼装置付石炭だき2缶方式

この場合の推進出力及び航続距離共に石炭専焼2缶方式と同様1缶が生きている限り安全操船出力上も非常航走距離上も問題ない。

補助重油だき設備を有する場合には上記石炭専焼2缶方式にくらべ、石炭関連設備が2缶共に故障した上にさらに補助重油燃焼装置による航走が可能であり、非常推進設備能力において優れているといえる。

#### (3) 給炭システムの二重性の範囲

##### (a) 給炭方式

アンケートの結果は、

空気搬送方式(デンスフェーズ)	6社
機械式コンベア方式	1社

であり、空気搬送方式がほとんどの造船所で採用された理由はパイプ輸送であるため炭じんがない、配管ルートの自由度が大きいこと、配管装置スペースが少なくて船用としてのメリットが大きく評価さ

れたためで、これが今後の石炭だき船の主流と考えられる。

機括式コンベア方式が1社で採用されている理由としては、少なくとも陸上で証明済の技術である等によるものと考えられる。

(b) 設備容量

搬送設備容量のアンケート結果は、

搬送ライン数	1 ライン搬送容量	
2 ライン／2 缶	2 缶分の MCE をまかなう	1 社
4 ライン／2 缶	"	4 社

であり、設備容量は少なくとも2缶に対し、2系統以上を有し、1系統故障時にも2缶がMCE（ボイラ最大蒸発量）で運転できる容量をもつこととしている。

またディリーサービスホッパの容量については適用したルール及び搬送容量にもよるがアンケート結果は、

1/2 缶 × 18 時間分	1 社
2/2 缶 × 12 時間分	3 社
2/2 缶 × 6 時間分	3 社

であり、少なくとも6時間分以上の容量をもたせている。

石炭庫の数は、1社の1個／2缶を除き、2個／2缶が採用されている。

(c) 給炭設備故障時のボイラ蒸発量

給炭システム故障時にもたせるべきボイラ蒸発量についてのアンケート結果は表現のちがいはあるがまとめると、

常用蒸発量を維持し切換え可能とする。	5 社
常用蒸発量の $\frac{1}{2}$ を発生しうる。	2 社

であり、各社共に2缶方式を前提にしていることから故障時の能力としては、常用蒸発量の  $\frac{1}{2}$  以上の蒸発量を発生しうるということであった。

(d) 信頼性確保のための留意事項

給炭システムの信頼性確保の観点から、石炭庫、ディリーサービスホッパのブリッジ形成対策、搬送設備のメインテナンス、設計上の留意事項については、表1.3.3の通り様々な対策配慮がなされている。

石炭庫、ディリーサービスホッパのブリッジ形成対策としては、ホッパ角度を  $50 \sim 70^\circ$  に保ち、ライニング材料としてステンレス鋼又は超高分子ポリエチレンもしくは特殊ライニングを施し、ブリッジブレーカとしてエヤハンマ、バイブレーターを装備する等がなされている。

またメインテナンスとしては、空気搬送ラインのパイプ摩耗部のチェック、ホッパ出力率のシールの交換等が挙げられている。

設計上の留意点としては石炭庫スペースを極小化し、石炭庫下のスペースを機関室から隔壁で分離し有效地に利用すること、石炭の払い出し性能を確保するための石炭庫の形状、セグリゲイション防止のためのシーケンス制御等が挙げられている。

(4) 灰処理システムの二重性の範囲

(a) 処理方式

灰処理システムは陸上石炭だきボイラの実績からドライ・ウェット両システムがありアンケート結果は、

ボトムアッシュ	ドライ — 空気	真空吸引	3 社
フライアッシュ		→ デンスフェイズ	1 社
ボトムアッシュ — ウエット — 水スラリー	— ジェットポンプ		
フライアッシュ — ドライ — 空気 — 真空吸引			3 社

であった。

フライアッシュについては全てドライシステムを採用しておりボトムアッシュがドライシステムならその搬送設備を共用し、ボトムアッシュがウエットシステムのところでは別にドライシステムの搬送設備を設けている。

ボトムアッシュにウエットシステムを採用している理由としては、ボトムアッシュの粒径が大きいことからホッパからの排出性及び高温灰を空気搬送することにより未燃分が再燃する心配から、水スラリーとして搬送するためである。

ボトムアッシュにドライシステムを採用しているのは、陸用での実績がある上にドライ・ウエット両システムをもつことによるシステムの複雑化がさけられるためである。

ドライシステムでもドライ空気一真空吸引システムを採用しているのは、真空吸引であるので灰の船内への漏洩がさけられるためである。

(b) 貯蔵方式

貯蔵方式は機関室配置上の理由から、1社を除き発生した灰を発生場所とは別の貯蔵タンクまで船内移送する方式を採用している。

直接貯蔵方式すなわち灰を発生した場所に直接貯蔵する方式を採用しているのは機関室配置上の制約にはなるが、船内移送ライン及びそのための所要動力が不要というメリットによるものである。

(c) 設備容量

貯蔵タンクの容量についてのアンケート結果は、

MCE(ボイラ最大蒸発量)の 3日分	3 社
" 3.5日分	1 社
" 5日分	1 社
その他(港停泊日数による又は10日分)	2 社

であり港内及び沿岸航海中等の船外へ排出できない期間に発生した灰を貯蔵する容量として3~5日分程度もしくは停泊期間によって決めるという結果であった。

(d) 灰処理システム故障時にもたせるべきボイラ蒸発量についてのアンケート結果は、

常用蒸発量を維持するよう切換可能とする。	2 社
常用蒸発量の $\frac{1}{2}$ の蒸発量を発生できる。	3 社
2缶方式とし各缶独立のシステムをもつ。	1 社
単一故障で蒸気の発生が止らない。	1 社

であった。

これから2缶方式を各社共に採用していることから常用蒸発量の  $\frac{1}{2}$  以上の蒸発量を発生しうる程度を一つの目安としている。

(e) 信頼性確保のための留意事項

灰処理システムの信頼性確保の観点からタンク、パイプラインの閉塞対策、メインテナンス、設計上の留意点について各社共様々の対策配慮がなされている。

タンク及びパイプの閉塞対策については、ドライシステムではクラッシャバイブレータの設置、ウエットシステムではクラッシャ及びタンクに水ジエットの設置、タンク形状の配慮が挙げられている。

メインテナンスについては、パイプ摩耗部のチェック、バッグフィルタの点検等が挙げられている。

設計上の留意点としては機関室の無人化を配慮した自動シーケンシャル運転、ドライシステムの場合灰ホッパ容量を大きくとり、灰が十分冷えるようにする等の安全上の配慮が挙げられている。

### 1.3 石炭だきボイラの損傷調査

資料 1.3.1 に過去の船舶及び陸用の石炭だきボイラの損傷例を示す。

これらの調査結果を事故の種別とボイラ形式により集計すると次表の通りとなる。

船用石炭だきボイラ (日本海事協会会誌による。)

事故種別	ボイラ形式		計
	丸ボイラ	水管ボイラ	
管の破裂破孔	1	2 (2)	3
管の屈曲垂下	1	3 (1)	4
管の膨出	1 (1)	2 (1)	3
管の腐食によるクラック	—	1	1

( )内は火炉に近い水管の損傷例を示す。

陸用石炭だきボイラ (ボイラ協会統計資料による。)

事故種別	ボイラ形式				計
	循環形	錆鉄ボイラ	煙管形	その他	
管の破裂亀裂	5	2	4	—	11
管の低水による漏洩	2	2	5	2	11
ガス爆発逆火	1	1	* 1	* 1	4

\*. 未燃ガスによるガス爆発を示す。

### 1.4 考 察

以上のアンケート調査及び石炭だきボイラの損傷例の調査を総合してボイラ数と補助油だき容量、ボイラ故障時の非常推進設備、給炭システムの二重性範囲、灰処理システムの二重性範囲、石炭だきボイラの損傷例についての考察を以下に述べる。

#### 1.4.1 ボイラ数と補助油だき容量

1.2.3 のアンケート調査結果にみられるように、各社共に 2 缶方式を採用しているが、これは各船級協会規制が原則として 2 缶方式を要求していることによるものであろう。

1.1 船級協会規則の調査(1)ボイラ数のところで述べたように 1 缶半方式・1 缶方式の場合には、主ボイラ故障時の補助ボイラや電気推進設備等を設けることが前提条件となる。

但し、A B のとき補助ボイラ又は非常用推進設備を設けず所要性能をもつ重油バーナ及び F D F 等の動的機器を二重に設ければ 1 缶方式とする可能性もないわけではないが、また、N V のとき信頼性解析を行い、1 缶方式とすることは実績が少なく現状では難しい点が多く、2 缶方式とすることが妥当な判断といえよう。

#### 1.4.2 ボイラ故障時の非常推進設備

ボイラ故障時の非常推進方法として、ボイラ構成(2 缶方式・1 缶半方式・1 缶方式)とボイラ型式との組み合せから次のものが考えられる。

ボイラ構成	主ボイラ型式	ボイラ故障時の非常推進方法
2 缶方式	1.石炭専焼ボイラ	1.残った 1 缶で航走
	2.重油燃焼装置付 石炭だきボイラ	1.残った 1 缶で航走(石炭だき) 2.重油燃焼に切換え航走(①1 缶石炭 + 1 缶油 ②2 缶とも油)
1 缶半方式	1.石炭専焼ボイラ	1.補助油だきボイラで航走
	2.重油燃焼装置付	1.補助油だきボイラで航走
	石炭だきボイラ	2.重油燃焼に切換え航走

1 缶 方 式	1.石炭専焼ボイラ	1.電気推進その他による航走
	2.重油燃焼装置付 石炭だきボイラ	1.重油燃焼に切換え航走 2.電気推進その他による航走

アンケートの結果は各社共に、2 缶方式を採用しており 2 缶方式を前提したものであった。しかし上表から 2 缶方式・1 缶半方式・1 缶方式いずれの場合も重油燃焼装置を設けておれば、石炭関連設備が故障時にも対処ができる、より信頼性の高いプラントといえる。但し、ボイラ全体が使用不能になった場合は、残った 1 缶又は補助油だきボイラ、電気推進設備等で航走することになる。

1 缶半方式及び 1 缶方式の非常推進設備能力についてのルール要求の内容は 1.1 船級協会規則調査、(4)補助油だき容量及び非常推進出力で述べているが、1 缶半方式の場合の補助ボイラの容量は安全航行速力 + 居住区サービス等を出しする程度とし、1 缶方式の非常用推進設備能力としても船の安全航行速力を出しする程度ということになろう。

船の安全航行速力は個々の船で設定されるべきものであるが、一般的には舵が利く船速程度と考えられよう。

これがボイラ故障時の非常推進設備の能力の指針の一つの目安と考えられる。

#### 1.4.3 給炭システムの二重性範囲

各社共に静的機器の石炭庫、デイリーサービスホッパは 2 個 / 2 缶搬送ラインは 2 ライン / 2 缶以上をもち、また動的機器のデンスユニット、エヤコンプレッサ、ベルトコンベアについては二重性を有しており、ルール要求を満しているといえる。

給炭システム故障時の二重性の範囲としては、2 缶方式では静的機器としての石炭庫は 1~2 個 / 2 缶、デイリーサービスホッパは 1~2 個 / 2 缶、搬送ラインは 2~4 ライン / 2 缶とし、動的機器としてのデンスユニットは 4 個以上 / 2 缶、エヤコンプレッサは 2 × 100 % とし、搬送能力としては、1 ライン 故障時にも他の 1 ラインで 2 缶分の常用蒸発量を有する程度が一つの目安と思われる。

2 缶方式で重油燃焼装置付石炭だきボイラのときは上記石炭専焼 2 缶方式より二重性の範囲をさらにせまくすることができると思われる。

さらに 1 缶半方式・1 缶方式の場合には、静的機器としての石炭庫は 1 個 / 1 缶、デイリーサービスホッパは 1 個 / 1 缶とし、動的機器としての、デンスユニットは 2 個以上 / 1 缶、エヤコンプレッサは 2 × 100 % 程度が関連設備故障時の二重性範囲の一つの目安と思われる。

#### 1.4.4 灰処理システムの二重性範囲

直接貯蔵方式を採用している 1 社及びボトムアッシュをウェット、フライアッシュをドライシステムとしている 1 社を除き各社共、船内移送ライン（灰発生場所から貯蔵タンクまで）はボトムフライアッシュ共に 1 系統としている。

また、静的機器のホッパタンクに対しては一重としており、動的機器のエダクタ駆動用の海水ポンプあるいはデンスユニットに対するエヤコンプレッサ及びバキュームポンプには二重性をもたせており、それもルール要求を満しているといえる。

灰処理システム故障時の二重性の範囲としては、2 缶方式では静的機器としてのホッパは 1 個 / 2 缶、貯蔵タンクは 1 個 / 2 缶、搬送ラインは 1 ライン / 2 缶とし、動的機器としてのエダクタ駆動用海水ポンプあるいはデンスユニットに対するエヤコンプレッサを 2 × 100 % とする程度が一つの目安と思われる。

重油燃焼装置付石炭だきボイラのときの 2 缶方式・1 缶半方式・1 缶方式については、上記 2 缶方式で二重性が要求されている動的機器についても一重でよいと思われる。

#### 1.4.5 石炭だきボイラの損傷例

1.3 の過去の舶用及び陸用の石炭だきボイラの損傷例の集計結果及び資料 1.3.1 から石炭だきボイラ

固有の損傷としては、次の3つと思われる。

- 1) 火炉に近い部分の水管の破孔屈曲・膨出
- 2) 水管の摩耗（資料1.3.2参照）
- 3) ダンバ操作ミス及び埋火によるガス爆発

1)の火炉に面する水管の損傷が多く起っている要因としては、三胴式水管式ボイラやスコッチ式丸ボイラ等の昔のボイラの場合火炉が十分大きくないため、火炎が直接水管に当ること及び不加熱降水管がないこと及びガスの偏流等により水循環も悪いことから損傷しているものと考えられる。

これに対し現在開発されている石炭だきボイラでは、火炉出口ガス温度を灰の軟化点以下になるよう火炉を大きく計画し、火炎が水管に直接当らないようにしており、また不加熱降水管を設け水循環をよくしており火炉に面する部分の水管の損傷に対する対策を講じている。

また、2)の水管の摩耗は昔の石炭だきボイラの場合、チューブとチューブの間の間隔が比較的せまいこと及びガスの偏流によりガス流速の早い所で局部的に起ったのではないかと思われる。

これに対する開発中の石炭だきボイラでは、チューブ間の距離を十分とり、ガス流速を低く抑え、ガス偏流が起りにくいようにチューブ摩耗に対し配慮がなされている。

3)のガス爆発は陸用ボイラで発生しており、陸用の場合構造がよくわからないがガスの流れが複雑で長いものが多く未燃ガスのたまりやすい構造になっていることによりガス爆発が起ったのではないかと推察される。

現在開発中の石炭だきボイラの場合では、ガスの抜けやすい構造としているが、給炭を止めてもなおグレート上に未燃の石炭が残っており、着火前には十分ブリバージを行う等の安全操作面の配慮が必要となろう。

以上、過去の石炭だきボイラの損傷例の原因とそれに対する対策について考察してきたが、損傷例はほとんど手だき又は下込めストーカ等のものであり、我々が計画しているスプレッダストーカのものではない。

むしろ損傷例で報告されていないスプレッダ、グレートそのもののトラブル、チューブの閉塞、給炭、灰処理上の事故の調査をする必要があろう。

資料 1.3.1 過去の船舶及び陸用の石炭だきボイラの損傷例

(1) 過去の船舶における石炭だきボイラの損傷(出典 日本海事協会会誌)

整理番号	船名	総トン数	製造年月	主機関及びボイラの種類	事故発生の年月	事 故 の 概 要
1 A	3720(汽)	昭和24年7月	タービン式機2400 SHP 三脚式水管ボイラ×2 $2.0 \text{kg}/\text{cm}^2, 350^\circ\text{C}$	右舷ボイラの左舷側の板は火に面した水管が3-4本崩壊した。 屈曲位置は、中央からやや下で外側へ約50mmに及んでいた。	昭和24年12月	
2 B	4387(汽)	1951年3月	蒸気タービン 2400 SHP 横山式水管ボイラ×2 $2.0 \text{kg}/\text{cm}^2$	ボイラ室より発火、機関室、石炭庫及び2船倉、162より前方の船橋棟及び向甲板以上(158より後方を除く)の全部に炎柱をこうむった。	1951年5月	
3 C	2215(汽)	1945年5月	三段膨脹機関(Dus型) 1,000 BHP 丸ボイラ×1 (2号缶) $1.6 \text{kg}/\text{cm}^2$	同 上 ボイラ後燃焼が激しく取付部附近で膨出し、ステー孔と火事曲線部との間にT字型の裂傷が発生した。なお後錐板の斜行ステー取付部では複数が密接されている。(改型)		
3 D	3 Br(W)	1951-9 (改修) 1946-2	蒸気タービン(甲-2.5型) 2,000 SHP 水管ボイラ (2.2号缶) ×2 $1.6 \text{kg}/\text{cm}^2$	同 上 主機連続運転第1度ビニオン側手輪の歯2枚が9枚折れた。(本操作は2.6年11月にも同様の事故のため折換している。) (2) 駆連支障第1度ビニオンの歯1枚が接着反対側歯端より約40mmの所から長さ約6.5mm欠損した。破面は良好状態をしている。 (3) 左舷ボイラの水管が蒸気ドーム内部管抜部にて2.0本崩壊した。又、右舷ボイラの水管2本は同部にクラックが発生していた。		
4 E	2 At(W)	1950-8 (改修)	蒸気タービン 2,600 SHP 水管ボイラ×2 $2.0 \text{kg}/\text{cm}^2$	同 上 左舷ボイラの蒸気管10本、水管管2本が下部ドラムより約4.5mmの位置で内面が腐蝕し(管厚2mmに減少)約5.0mmの間少しく膨出した。		
5 F	6783(汽)	1949-12	蒸気タービン 3,600 SHP 水管ボイラ×3 $2.0 \text{kg}/\text{cm}^2$	同 上 第1ボイラの小型水ドーム側1列目2-4番の管が破孔しその他の焼損大型水ドーム側は上部が焼損し、並管部に數本の漏洩の跡が認められた。		
6 G	3719(汽)	1949-7	蒸気タービン 2,400 SHP 水管ボイラ (三脚式) ×2 $2.0 \text{kg}/\text{cm}^2 \times 350^\circ\text{C}$	同 上 第2ボイラの大形及び小型ドームの水管中、火側の第1列目が、1本及び殆んど全部火側に屈曲しており、その最大のものは火床機上約2.8mの高さで4.0mm突出した。	1952-9	
7 H	2277(汽)	1952-3	複二段膨脹式機(レシフ) 4401 HP 丸ボイラ×2 $1.6 \text{kg}/\text{cm}^2$	同 上 両主ボイラの各火室の鞍部が火炉の中央でゆくに従い次第に焼く最大4.0mm垂下した。内部油が漏着して過熱したものと想像される。	1952-8	
8 I	2T L(T油)	昭和20年2月	タービン式機(甲50型) 水管ボイラ (2.1号缶1×2) $1.6 \text{kg}/\text{cm}^2$	同上 右舷ボイラ: 右舷側の最も火に面した水管14本が局部的に膨出した。	昭和24年11月	
9 J	2T L T(T油)	昭和20年7月	同 上	右舷ボイラ: 左舷側水管14本が局部的に膨出した。膨出した位置は高さ約1mの所である。 左舷ボイラ: 左舷側の火に面した水管計29本(大管4本、小管25本)が局部的に良耗破孔した。破孔位置は、水下ラム附板より約5.0mの所である。	昭和24年12月	

### [事故例] - 1

#### (1) 事故の概要

昭和28年8月1日午前九時頃香川県小豆島附近で、突如主ボイラ（戦時標準2号型ボイラ）の水管が破裂し、ボイラ室で作業中の船員2名が缶前に噴出して来た蒸気のため死亡、機関室の船員2名中1名が重傷、他の1名は軽傷を負うという事故が発生した。

#### (2) 本船及び機関の経歴

本船は、昭和20年2月建造された戦標2D型で、主機関は某社製のD型三連成往復汽機、主ボイラは、2号型丸ボイラ1基で、石炭だきである。

本船は建造後ずっと貨物船として用いられて来たが、昭和25年5月、セメント運搬船に改装されて今日に及んだが、事故発生前の昭和28年3月の中間検査では特に水管についての注意は報告されていない。

なお、本船のボイラは従来概して良好であったが、セメント運搬船に改造されて以来給水管系統、ボイラ煙管等に若干の腐食発生が報告されている。

#### (3) 事故の状況

破裂した水管は、右舷側（缶前から見て左側）より起算して、13本目であって、水管中央部附近後部煉瓦積に面した箇所が、縦方向に裂け、縦8.7mm、横7.5mmの破孔を生じ、破裂時の反動で前方に屈曲したため、ボイラ後鏡板に当たってW形になっていた。後部煉瓦積は、熱水が強く当った所が脱落し、その他は弛みを生じていた。

### [事故例] - 2

#### (1) 事故の概要

昭和26年10月の定期検査時に倉内、石炭庫内、主機室内の船側縦通材の面合溶接にき裂が見られた。また、第二船倉石炭庫及び主機室の外板（左舷）船側縦通材の外板への溶接個所の端で夫々1カ所、長さ約7.0mmのき裂が発生していた。

#### (2) 本船の経歴

本船は、昭和22年12月に建造された総トン数2,565トンの貨物船で、主丸ボイラを有する石炭だき船である。

### [その他]

- ① 石炭だきボイラの水管の衰耗（衰耗率0.75～1.5mm/year程度が数隻に報告されている。
- ② ショートウォータによる損傷が7隻に報告されている。
- ③ 2隻に石炭庫内の発火（原因不明）が報告されている。

#### (2) 過去の陸用石炭だきボイラの損傷例（出典 ボイラ協会統計資料）

整理番号	業種	種類	圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	伝熱面積 (m <sup>2</sup> )	燃料	燃焼方式	事故の状況	原因
1	紙製造業	循環形	7.0		石炭	鎖床ストーカ	水管の破裂	水管の外部腐食とチューブクリーナによる水管の損傷
2	教育業	鋳鉄ボイラ			石炭	手だき	セクションの亀裂	給水装置の不備による
3	商社	鋳鉄ボイラ	0.5	15	石炭	手だき	セクションの亀裂	冷水直送による温度変化
4	商社	鋳鉄ボイラ	0.7	11	石炭	下込めストーカ	バックセクションの亀裂	急激な上昇のため

5		横 煙 管 形	6.9	3 0	石 炭	手だき	煙管の変形 および取付 け部の漏れ	送気はげしく給水を怠る
6	合 板 製 造 業	循環形					クリンカーボ ックスの破裂	ストーカ冷却水用のバルブ 締切りのため
7	乳 製 品 製 造 業	循環形	1 0.0	1 0 8	石 炭	鎖 床 ストーカ	水管1本摩 耗による穴 あきと漏れ	すす吹き器の噴気が水管に 直射した。取付けに対する 点検怠慢
8	紙 加 工 品 製 造 業	循環形	1 6.0	1 2 8	石 炭	鎖 床 ストーカ	"	"
9	食 料 品 加 工 業	循環形	1 1 4.0	6 8 5	石 炭 重 油	微粉炭バ ーナ・油 バーナ	空気抜き管 穴あき	集合管寄(空気抜き)の管 のイオウ分による腐食
10	乳 製 品 製 造 業	循環形	1 6.0	1 8 4	石 炭	鎖 床 ストーカ	低水による 漏れ	水面計通気弁を閉止したた めの水位の不正指示
11	療 養 所	貫流形	1 0.0	3 1	石 炭	下込め ストーカ	低水による 破裂	ボイラ室に取扱い者不在で 水位未確認アラーム不調
12	化 学 工 業	循環形	1 2.0	1 3 0	石 炭	鎖 床 ストーカ	水冷管全部 変形と漏れ	他の修理のため水位を監視 せず低水
13		炉筒形	7.0	7 3	石 炭	手だき	低水による 炉筒の圧潰	給水を忘れたため
14	織 物 業	横 煙 管 形	5.6	5 9	石 炭	下込め ストーカ	低水による 煙管取付け 部の漏れ	ポンプの動作不良による (無人)
15	商 社	鍛 鉄 ボイラ	0.7	1 0	石 炭	下込め ストーカ	低水過熱に よる亀裂	取扱者が現場を離れたため の監視不十分(無人)
16	化 学 工 業	横 煙 管 形	1.0	1 0 7	コーキス	手だき	低水による 胴脇部と後 煙管取付け 部の漏れ	停電のため給水ポンプが停 止し、それに対する処置が 遅れたため
17	化 学 工 業	横 煙 管 形	7.0	1 1 9	コーキス	手だき(誘 引通風)	低水による 漏れ	吹出コックの閉め忘れ、取 扱者の経験不足(無免許)
18	乳 製 品 製 造 業	立 て 横管形	4.0	2	石 炭	手だき	低水による 煙管変形	無人運転
19	運 輸 事 業	横 煙 管 形			石 炭	手だき	ガス爆発	煙道に未燃ガス充满してい るところで煙室扉を開いたた め
20	商 社	鍛 鉄 ボイラ	1.1	9	粉 炭	下込め ストーカ	ガス爆発	前日の埋火が多く、未燃ガ スに着火したため
21	繊 維 工 業	炉筒形	7.0	7 4	石 炭	手だき	逆火および 二次燃焼	無理だき・二次燃焼
22	化 学 工 業	循環形					ガス爆発	停電における通風の不安定

燃 燃 方 式 と 事 故

統計別	(1) 委員会統計資料										(3) 委員会 統計外資料					
	水管ボイラ					丸ボイラおよび 鉄ボイラ										
ボイラ形式	燃料別	石炭	重油				石炭	重油				石炭	重油			
		スト ト カ 压	油	ロ ー タ リ ー ス ト ス ト カ 压	噴 射 式 明 ス ト ス ト カ 压	不 明 ス ト ス ト カ 压	ガ ス ス ト ス ト カ 压	油	ロ ー タ リ ー ス ト ス ト カ 压	噴 射 式 明 ス ト ス ト カ 压	不 明 ス ト ス ト カ 压	油	ロ ー タ リ ー ス ト ス ト カ 压	不 明 ス ト ス ト カ 压		
事故の種別	燃焼装置別	裂開破裂	2	5	2	(1) 4	8		2		1	(1) 1	1	5		3
		膨出	1	1	1				3		1	1		1	1	
		変形変質	1	1		1		1	2	2	1				4	
		漏れ	1	4	4		1		1		2				(1) 2	

注 (1) 石炭だきには手だき、鎖床、移床およびスプレッダ方式を含む。

(2) 記載外に石炭だき炉筒ボイラの炉筒膨出事故あり

(3) 水管には循環、貫流を含む。

(4) 括弧内の数字は食通による漏れ

[ その他の事故 ]

石炭だきの取扱い上の欠陥による事故として下記の代表例がある。

- (i) ダンバを開放せず着火したもの；燃焼停止後、炉内煙道などにガスが残留しガス爆発をおこしたもの。
- (ii) 前日の埋火が多く未燃ガスに着火したもの；埋火により煙道に未燃ガスが充満しているところで急にダンバを開いたために埋火が燃えだしガス爆発となつたもの。

## 2. 石炭だきボイラの動特性解析プログラムの作成

ストーカ燃焼方式石炭だきボイラの制御方式は、陸上ボイラにおいてはすでにほぼ確立された技術といえるが、これが船用ボイラに対してもそのまま応用可能であるかどうかは石炭だき船実用化の上での重大関心事である。

本研究はその技術確立の基礎となる船用ストーカ燃焼方式石炭だきボイラの動特性解析をコンピュータシミュレーションプログラムにより行い問題点の抽出とその対策を考察しようとするものであるが、本年度はその第1歩として制御系を除いたオープンループとしてのプログラムの作成とその確認計算を行った。

来年度は制御系を含めたクローズドループとしてのプログラムを作成の上動特性の解析を行うと共に重油だきボイラとの比較検討を行う予定である。

### 2.1 対象ボイラのモデル化

モデル化したボイラは、図1.3.1に示すような構成を有するスプレッダストーカだき船用自然循環ボイラで要目は蒸発量(最大負荷時)31T/H、蒸気条件(過熱器出口)61.0kg/cm<sup>2</sup>×490℃である。これをモデル化したのが図1.3.2である。

このモデルを数式化するにあたり、次の3グループに分けて考えた。

- (1) 燃料 - 空気 - 燃焼ガス系 (加熱側)
- (2) 水 - 蒸気側(蒸気ドラムを含む) (被加熱側)
- (3) 過熱器系 (被加熱側)

給炭機より投入された石炭は、スプレッダにより炉内に散布され、一部は浮遊燃焼し、大部分はストーカグレート上にて燃焼する。燃焼ガスは、火炉、スクリーン管群、高温過熱器、低温過熱器、対流蒸発管群及びエコノマイザを経て、誘引通風機により誘引される。

エコノマイザにて加熱されたボイラ給水は、蒸気ドラムにて飽和水となり、各降水管を経て、水ドラム又各管寄に到り火炉、スクリーン管群及び対流蒸発管群等の上昇管群に供給される。各上昇管群の熱負荷に応じて発生する汽水混合物は蒸気ドラムに到り、汽水分離される。蒸気ドラムからの飽和蒸気は、低温／高温過熱器を経て過熱蒸気となり、タービンに至る。過熱蒸気温度は、水ドラム内に設置された過熱温度低減器により所定の温度に低減される。

なお、定常状態においては、蒸気ドラム内、上昇管内、降水管内、水ドラム内および各管寄内流体温度は、すべて飽和温度の状態にあると仮定した。又通常、蒸気ドラム内に設置されている、補助蒸気用過熱温度低減器は、本モデルにおいては省略した。

また基礎方程式のプログラム化にはデジタルシミュレーションランゲージを使用した。デジタルシミュレーションランゲージは、各計算機メーカーにより、その計算機システムに合ったものが開発されているが、ここではIBM社のCSMP-III(Continuous System Modeling Program-III)デジタルシミュレーションランゲージによった。

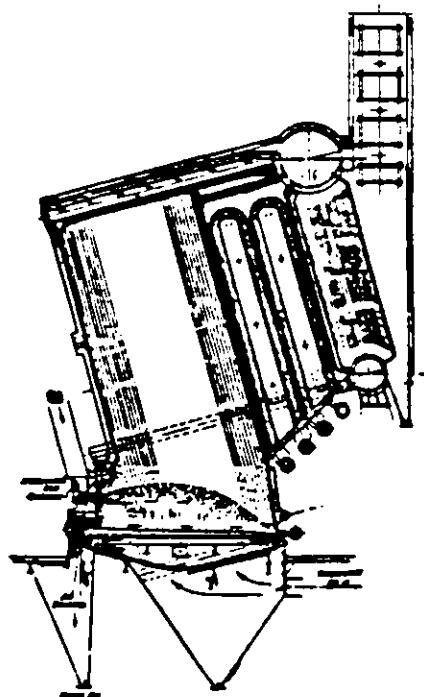


図 1.3.1 ストーカだき船用ボイラ

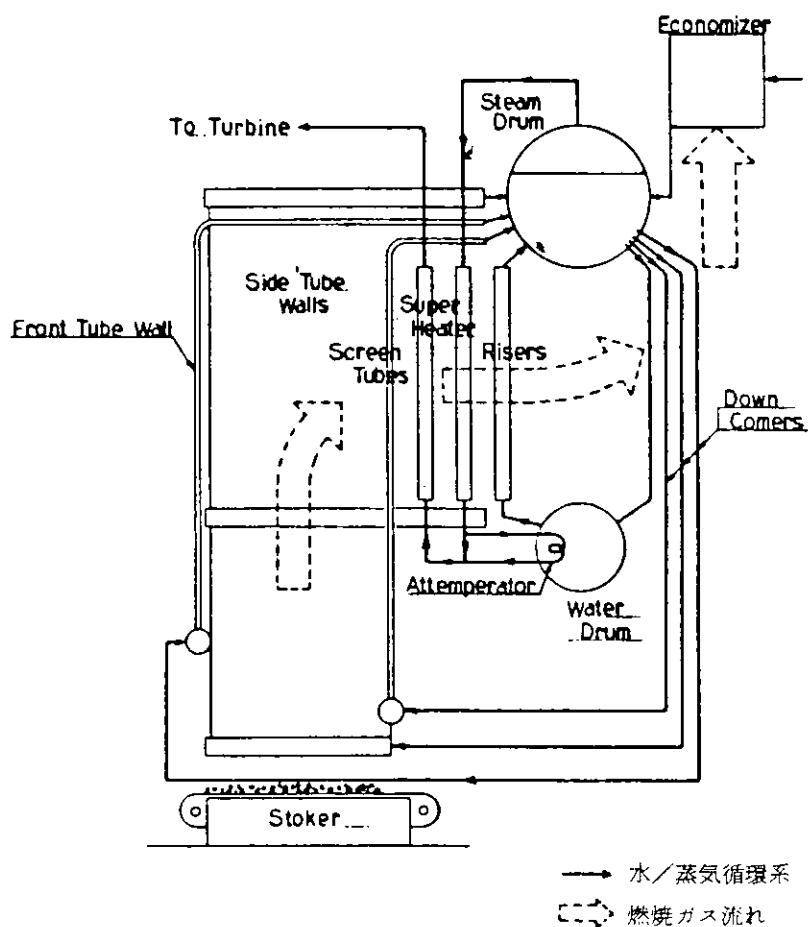


図 1.3.2 水／蒸気循環系及び燃焼ガス流れ系統図

## 2.2 解析プログラム

### 2.2.1 フロー チャート

フロー チャートを図 1.3.3 に示す。ここで、『ボイラ固有データ』とは、上昇管の本数、内径、長さ、降水管の本数、内径、長さ、各管材重量等のボイラの幾何学的形状値、加えて、沸騰熱伝導率、給水及び蒸気比熱等プログラム上定数として扱われる各種物性値、さらに入口／曲り損失係数等の特性計算に必要な係数、定数である。

『初期値データ』とは、ボイラ特性応答を計算する際の、基準負荷における、ボイラ性能値及び係数値である。

『テストデータ』とは、ボイラ特性応答を計算するための外乱データであり、負荷変動等の変化である。

また、『CSMP SUBROUTINE PROGRAM』とは、この場合 CSMP-III がそなえている各種アプリケーション・プログラムをさす。

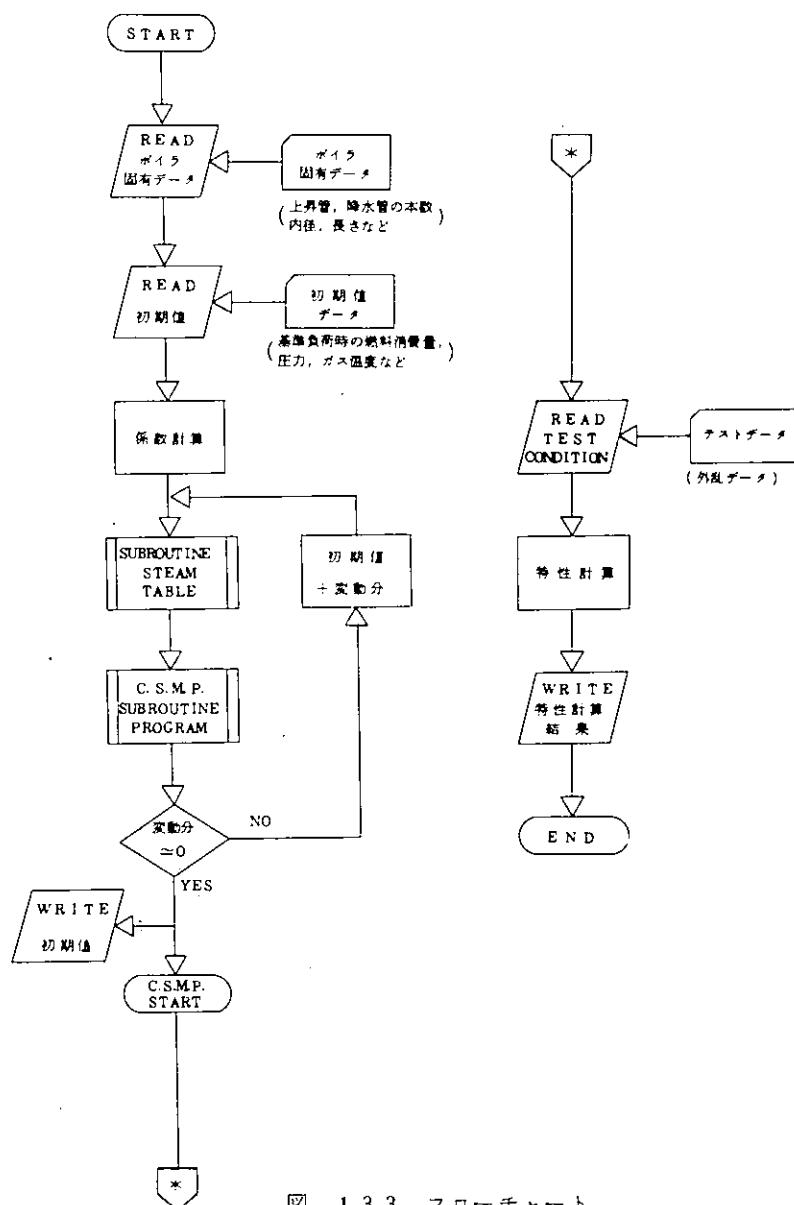


図 1.3.3 フロー チャート

## 2.2.2 インプットおよびアウトプットデータ

### (1) インプット・データ

上記フローチャートに従い、CSMP-IIIで計算すればよいのであるが、ディジタルシミュレーションの特性として初期値がほぼ完全に満足しバランスしていないと、積分計算するにしたがって、誤差が累積される。

したがって、まず基準負荷におけるボイラ静特性計算結果、すなわちヒートバランス、伝熱計算、水循環計算及び蒸気／ガス側圧力計算等の結果は、相互に矛盾なくバランスしていかなければならない。

インプットデータは、上記を満足している「初期値データ」、ボイラの幾何学的形状値等を表わす「ボイラ固有データ」及びボイラ特性応答を計算するための外乱データとなる「テストデータ」の3種類であり、これらを表1.3.1 a～1.3.1 cに示す。

なお、石炭の発熱量、粒度分布及び工業分析値については、本プログラム上では、次のように扱つた。すなわち石炭の発熱量は、あらかじめ与えられる石炭の元素分析値と高位発熱量よりその低位発熱量を求めこれを、初期値データの一つとしてインプットするものとして実際の熱計算と一致させた。

粒度分布は、浮遊燃焼の割合を求める目安として使用することができる。すなわち約2m/m径以下の石炭は、経験上、浮遊燃焼すると考えられるので、粒度分布より浮遊燃焼の割合を求めたうえで、それを初期値データの一つとしてインプットすることにした。

又、ボイラ及びその燃焼装置は、使用石炭性状を正しく把握して、正常な燃焼が行なわれるよう設計調整されるので、石炭工業分析値すなわち、固有水分、揮発分、固定炭素及び灰分のボイラ動特性への直接の影響はないものとした。これらの成分は、ボイラ基準負荷データ（初期値データ）の算出のみに使用している。

### (2) アウトプット・データ

ボイラ特性結果として、次の諸量の変化をアウトプットするものとし、

浮遊燃焼量	:	$G_{BF}$
グレート上燃焼量	:	$G_{BC}$
高温側過熱器出口温度	:	$T_{eO}$
高温側過熱器出口圧力	:	$P_{eO}$
蒸気流量	:	$G_D$
給水流	:	$G_f$
エコノマイザ入口給水圧力	:	$P_{in}$
蒸気ドラム圧力	:	$P_z$
蒸気ドラム水位	:	$y$
火炉ガス圧力	:	$P_R$

単位を付して表1.3.2に示す。

## インプット／アウトプット一覧

## 及び記号対応表

表1.3.1 a インプットデータ〔ボイラ固定データ(定数系)〕

記号	単位	内容
A <sub>1</sub>	$m^2$	エコノマイザ管内断面積
A <sub>7</sub>	"	低温側過熱器管内断面積
A <sub>8</sub>	"	過熱温度低減器管内断面積
A <sub>9</sub>	"	高温側過熱器管内断面積
A <sub>D</sub>	"	蒸気ドラム等価断面積
A <sub>i d</sub>	"	降水管断面積 ( $i = 3, 4, 5, \& 10$ )
A <sub>i r</sub>	"	上昇管断面積 ( $i = 3, 4, 5, \& 6$ )
a, b, c		誘引通風機性能曲線係数
C <sub>B</sub>		浮遊燃焼割合
C <sub>M1</sub>	$kcal/kgC$	エコノマイザ管材比熱
C <sub>Mi</sub>	"	上昇管管材比熱 ( $i = 3, 4, 5, \& 6$ )
C <sub>p f</sub>	"	エコノマイザ給水比熱
C <sub>p 1</sub>	"	低温側過熱器蒸気比熱
C <sub>p 8</sub>	"	過熱温度低減器蒸気比熱
C <sub>p 9</sub>	"	高温側過熱器蒸気比熱
C <sub>R<sup>13</sup></sub>	$kcal/SC$	火炉前壁輻射係数
C <sub>R<sup>14</sup></sub>	"	火炉側壁 "
C <sub>R<sup>15</sup></sub>	"	火炉スクリーン輻射係数
C <sub>R<sup>10</sup></sub>	$kcal/kgC$	火炉燃焼ガス比熱
C <sub>R<sup>20</sup></sub>	"	スクリーン管部燃焼ガス比熱
C <sub>R<sup>30</sup></sub>	"	高温側過熱器 "
C <sub>R<sup>40</sup></sub>	"	低温側過熱器 "
C <sub>R<sup>50</sup></sub>	"	対流蒸発管部 "
C <sub>R<sup>60</sup></sub>	"	煙道部 "
C <sub>R<sup>70</sup></sub>	"	エコノマイザ部 "
C <sub>L<sup>3</sup></sub>	"	空気比熱
C <sub>SL</sub>	$kg/kg$	理論空気量(燃料1kgあたり)
C <sub>SR</sub>	"	理論燃焼ガス量(燃料1kgあたり)
C' <sub>20</sub>		スクリーン管部ガス側伝熱係数
C' <sub>30</sub>		高温部過熱器 "
C' <sub>40</sub>		低温部過熱器 "
C' <sub>50</sub>		対流蒸発管部 "
C' <sub>70</sub>		エコノマイザ "
D <sub>2</sub>	$m$	蒸気ドラム内径
D <sub>i d</sub>	"	降水管内径 ( $i = 3, 4, 5, \& 10$ )
D <sub>i r</sub>	"	上昇管内径 ( $i = 3, 4, 5, \& 6$ )
F <sub>grate</sub>	$m^2$	グレート面積
f <sub>id</sub>		降水管内摩擦係数 ( $i = 3, 4, 5, \& 10$ )

$H_w$	$\text{kal/kg}$	飽和水比エンタルピ
$H_v$	"	飽和蒸気 "
$H_f$	"	蒸気ドラム入口給水比エンタルピ
$H_{fg}$	"	$H_v - H_w$ 蒸発潜熱
$H_u$	"	燃料低位発熱量
$K_{BC}$		グレート上燃焼係数
$K_{R20}$		スクリーン管部ガス側抵抗係数
$K_{R30}$		高温側過熱器 "
$K_{R40}$		低温側過熱器 "
$K_{R50}$		対流蒸発管部 "
$K_{R60}$		煙道部 "
$K_{R70}$		エコノマイザ部 "
$L_1$	$m$	エコノマイザ全管長
$L_2$	"	蒸気ドラム長さ
$L_7$	"	低温側過熱器管長
$L_8$	"	過熱温度低減器管長
$L_9$	"	高温側過熱器管長
$L_{id}$	"	降水管長さ ( $i = 3, 4, 5, \& 10$ )
$L_{ir}$	"	上昇管長さ ( $i = 3, 4, 5, \& 6$ )
$M_1$	$kg$	エコノマイザ保有水量 ( $= \gamma_w A_1 L_1$ )
$M_2$	"	蒸気ドラム保有水量
$M_{10}$	"	水ドラム保有水量
$M_{M1}$	"	エコノマイザ管材メタル重量
$M_{M7}$	"	低温側過熱器メタル重量
$M_{M8}$	"	過熱温度低減器管メタル重量
$M_{M9}$	"	高温側過熱器メタル重量
$M_{Mi}$	"	上昇管管材重量 ( $i = 3, 4, 5, \& 6$ )
$m_{3d}$		降水管本数 ( 火炉前壁 )
$m_{4d}$	" ( 火炉側壁 )	
$m_{5d}$	" ( スクリーン管部 )	
$m_{10d}$	" ( 対流蒸発管部 )	
$n_3$		上昇管本数 ( 火炉前壁 )
$n_4$	" ( 火炉側壁 )	
$n_5$	" ( スクリーン管部 )	
$n_6$	" ( 対流蒸発管部 )	
$R_{R10}$	$kg/kg \text{ } ^\circ\text{K}$	火炉内ガス定数
$R_{R50}$	"	対流蒸発管部ガス定数
$R_{R70}$	"	エコノマイザ部ガス定数
$\gamma_7$	$kg/m^3$	過熱蒸気比重量
$\gamma_8$	"	"
$\gamma_9$	"	"
$\gamma_{BC}$	"	グレート上石炭見掛け比重量

$\gamma_{L30}$	$kg/m^3$	ストーカグレート部入口空気比重量
$\gamma_W$	"	飽和水比重
$T_{FF}$	S	浮遊燃焼時定数
$u_{s,s}$	$kcal/CS$	強制対流沸騰伝熱係数(火炉前壁)
$u_{4,s}$	"	(火炉側壁)
$u_{5,s}$	"	(スクリーン管部)
$u_{6,s}$	"	(対流蒸発管群部)
$u_{10,s}$	"	(過熱低減器水側)
$V_{R10}$	$m^3$	火炉内燃焼ガス容積
$V_{R20}$	"	スクリーン管部ガス容積
$V_{R30}$	"	高温側過熱器 "
$V_{R40}$	"	低温側過熱器 "
$V_{R50}$	"	対流蒸発管部 "
$V_{R60}$	"	煙道部 "
$V_{R70}$	"	エコノマイザ部 "
$v_w$	$m^3/kg$	飽和水比容積
$v_v$	"	飽和蒸気比容積
$v_{fg}$	"	$v_v - v_w$
$\lambda$		上昇管内摩擦係数
$\xi_1$		エコノマイザ水側圧力損失係数
$\xi_7$		過熱器系圧力損失係数
$\xi_8$		"
$\xi_9$		"
$\xi_{idi}$		降水管入口損失係数( $i = 3, 4, 5, \& 10$ )
$\xi_{idB}$		降水管曲り損失係数( " )
$\xi_{iri}$		上昇管入口損失係数( $i = 3, 4, 5, \& 6$ )
$\xi_{irB}$		上昇管曲り損失係数( " )

表 1.3.1 b インプットデータ [ 初期値データ (変数系) ]

記号	単位	内容
$E_1$	$kcal/S$	エコノマイザ管内給水受熱量
$E_3$	"	火炉前壁管内側受熱量
$E_4$	"	火炉側壁 "
$E_5$	"	スクリーン管部管内側受熱量
$E_6$	"	対流蒸発管部 "
$E_7$	"	低温側過熱器 "
$E_8$	"	過熱低減器管外側受熱量
$E_{8,v}$	"	" 管内蒸気側受熱量
$E_9$	"	高温側過熱器管内受熱量
$E_B$	"	火炉投入熱量
$E_{R1}$	"	火炉水冷壁受熱量( $= E_{R13} + E_{R14} + E_{R15}$ )
$E_{R2}$	"	スクリーン管部対流熱伝達量

$E_{R_3}$	$kcal/S$	高温側過熱器受熱量
$E_{R_4}$	"	低温側過熱器 "
$E_{R_5}$	"	対流蒸発管部 "
$E_{R_7}$	"	エコノマイザ受熱量
$E_{R_{13}}$	"	火炉前壁 "
$E_{R_{14}}$	"	火炉側壁 "
$E_{R_{15}}$	"	スクリーン管部(火炉後壁)受熱量 $= E_{R_{15}} + E_{R_2}$
$G_{3,d}$	$kg/S \cdot m_3, d$	火炉前壁降水管流量
$G_{3,r}$	$kg/S \cdot n_3$	" 上昇管流量
$G_{4,d}$	$kg/S \cdot m_4, d$	火炉側壁降水管流量
$G_{4,r}$	$kg/S \cdot n_4$	" 上昇管流量
$G_{5,d}$	$kg/S \cdot m_5, d$	スクリーン管部降水管流量
$G_{5,r}$	$kg/S \cdot n_5$	" 上昇管流量
$G_{6,i}$	$kg/S \cdot n_6$	対流蒸発管入口流量
$G_{6,R}$	"	" 出口流量
$G_8$	$kg/S$	過熱低減器蒸気流量
$G_{10,d}$	$kg/S \cdot m_{10}, d$	対流蒸発管降水管流量
$G_B$	$kg/S$	投入石炭量
$G_{BC}$	"	グレート上燃焼量
$G_{BF}$	"	浮遊燃焼量
$G_D$	"	蒸気流量
$G_{D0}$	"	降水管合計流量
$G_f$	"	給水流量
$G_{L_3}$	"	火炉流入燃焼空気流量
$G_{R_1}$	"	火炉出口ガス量
$G_{R_2}$	"	スクリーン管部出口ガス量
$G_{R_3}$	"	高温側過熱器ガス量
$G_{R_4}$	"	低温側 " "
$G_{R_5}$	"	対流蒸発管部 "
$G_{R_6}$	"	煙道部 "
$G_{R_7}$	"	エコノマイザ部ガス量
$G_r$	"	上昇管合計流量
$G_v$	"	上昇管内合計蒸気流量
$M_{R_1}$	$kg$	火炉滞留ガス量
$M_{R_2}$	"	スクリーン管部滞留ガス重量
$M_{R_3}$	"	高温側過熱器 "
$M_{R_4}$	"	低温側過熱器 "
$M_{R_5}$	"	対流蒸発管部 "
$M_{R_6}$	"	煙道部 "
$M_{R_7}$	"	エコノマイザ部 "
$M_{BC}$	"	グレート上滞留燃焼重量

$P_{in}$	$\text{kg}/\text{m}^2$	エコノマイザ入口給水圧力
$P_2$	"	蒸気ドラム圧力
$P_3$	"	火炉前壁ヘッダ圧力
$P_4$	"	火炉側壁 " "
$P_5$	"	スクリーン " "
$P_{7,0}$	"	低温側過熱器出口圧力
$P_{9,i}$	"	高温側過熱器入口圧力
$P_{9,o}$	"	" " 出口 "
$P_{10}$	"	水ドラム圧力
$P_{R,1}$	"	火炉内ガス圧力
$P_{R,2}$	"	スクリーン管部ガス圧力
$P_{R,3}$	"	高温側過熱器ガス圧力
$P_{R,4}$	"	低温側 " "
$P_{R,5}$	"	対流蒸発管部 "
$P_{R,6}$	"	煙道部 "
$P_{R,7}$	"	エコノマイザ部ガス圧力
$P_{R,8}$	"	誘引通風機吐出ガス圧力
$P_{O,2}$	%	炭層内平均酸素濃度
$Q_{R,1}$	$\text{kcal}$	火炉滞留熱量
$Q_{R,3}$	"	高温側過熱器滞留熱量
$Q_{R,4}$	"	低温側 " "
$Q_{R,5}$	"	対流蒸発管部 "
$Q_{R,7}$	"	エコノマイザ部滞留熱量
$\gamma_{3,r}$	$\text{kg}/\text{m}^3$	火炉前壁上昇管出口平均比重量
$\gamma_{4,r}$	"	火炉側壁 " "
$\gamma_{5,r}$	"	スクリーン管部 "
$\gamma_{6,i}$	"	対流蒸発管部上昇管入口平均比重量
$\gamma_{6,r}$	"	対流蒸発管部上昇管出口平均比重量
$\gamma_{av,3}$	"	火炉前壁上昇管混合平均比重量
$\gamma_{av,4}$	"	火炉側壁上昇管 "
$\gamma_{av,5}$	"	スクリーン管部上昇管混合平均比重量
$\gamma_{av,6}$	"	対流蒸発管部 " "
$S$	$m$	炭層平均厚さ
$T_2$	$^\circ\text{C}$	蒸気ドラム内飽和温度
$T_{7,0}$	"	低温側過熱器出口蒸気温度
$T_{8,0}$	"	過熱低減器出口蒸気温度
$T_{9,i}$	"	高温側過熱器入口蒸気温度
$T_{9,o}$	"	高温側過熱器出口蒸気温度
$T_f$	"	蒸気ドラム入口給水温度
$T_i$	"	エコノマイザ入口給水温度
$T_{L,3}$	"	火炉流入空氣温度
$T_{LR}$	"	基準空氣温度

$T_{M1}$	°C	エコノマイザ管壁温度
$T_{M3}$	"	火炉前壁上昇管 "
$T_{M4}$	"	火炉側壁上昇管 "
$T_{M5}$	"	スクリーン管 "
$T_{M6}$	"	対流蒸発管壁温度
$T_{M7}$	"	低温側過熱器壁温度
$T_{M8}$	"	過熱低減器 "
$T_{M9}$	"	高温側過熱器 "
$T_{R1}$	"	火炉出口 ガス温度
$T_{R2}$	"	スクリーン管部出口 "
$T_{R3}$	"	高温側過熱器出口 "
$T_{R4}$	"	低温側過熱器出口 "
$T_{R5}$	"	対流蒸発管部出口 "
$T_{R6}$	"	煙道部出口 "
$T_{R7}$	"	エコマイザ出口 "
$T_{R2a}$	"	スクリーン管部平均 "
$T_{R3a}$	"	高温側過熱器平均 "
$T_{R4a}$	"	低温側 " "
$T_{R5a}$	"	対流蒸発管部 "
$T_{R6a}$	"	煙道部 "
$T_{R7a}$	"	エコノマイザ "
$u_1$	$\text{kal}/\text{SC}$	エコノマイザ管内側熱伝達係数
$u_7$	"	低温側過熱器 " "
$u_8 v$	"	過熱低減器 " "
$u_9$	"	高温側過熱器 " "
$u_{R2}$	"	スクリーン管部ガス側熱伝達係数
$u_{R3}$	"	高温側過熱器 "
$u_{R4}$	"	低温側過熱器 "
$u_{R5}$	"	対流蒸発管部 "
$u_{R7}$	"	エコノマイザ部 "
$W_o$	$\text{m}^3/\text{s}$	グレート上炭層通過平均ガス容積
$x_{s,r}$		火炉前壁上昇管出口乾き度
$x_{4,r}$		火炉側壁 "
$x_{5,r}$		スクリーン管部 "
$x_{6,i}$		対流蒸発管部入口乾き度
$x_{3,r}$		出口乾き度
$Y$	$m$	蒸気ドラム内水位
$\lambda$		空気過剰率
$\phi_3$		マルチネリ係数(火炉前壁上昇管)
$\phi_4$	"	(火炉側壁上昇管)
$\phi_5$	"	(スクリーン管)
$\phi_6$	"	(対流蒸発管)

表1.3.1 c インプットデータ〔テストデータ(変数系)〕

記号	単位	内容
$G_B$	$kg/s$	投入石炭量
$G_D$	"	蒸気流量
$G_f$	"	給水流量
$G_{L_s}$	"	火炉流入燃焼空気重量
$P_{90}$	$kg/m^2$	高温側過熱器出口圧力
$P_{in}$	"	エコノマイザ入口給水圧力
$T_{in}$	°C	エコノマイザ入口給水温度
$T_{L_s}$	"	火炉流入空気温度

表1.3.2 アウトプットデータ

記号	単位	内容
$G_{BC}$	$kg/s$	グレート上燃焼量
$G_{BF}$	"	浮遊燃焼量
$G_D$	"	蒸気流量
$G_f$	"	給水流量
$P_2$	$kg/m^2$	蒸気ドラム圧力
$P_{90}$	"	高温側過熱器出口圧力
$P_{in}$	"	エコノマイザ入口給水圧力
$P_{R1}$	"	火炉ガス圧力
$T_{90}$	°C	高温側過熱器出口温度
$y$	m	蒸気ドラム水位

## 2.3 ディジタル シミュレーション用基礎方程式

### 2.3.1 燃料-空気-燃焼ガス系

この系は、次の8ブロックにわけて考えた。

燃料・火炉部、スクリーン部、高温過熱器部、低温過熱器部、対流蒸発管群部、煙道キャビティ部、エコノマイザ部及び誘引通風機部の8ブロックである。各ブロックに対する基礎方程式を次に示すが燃料・火炉部および誘引通風機部以外のブロックについては対流による伝熱を共通としているのでこれらの基礎方程式は各ブロック共通の代表式として記述した。

なお、この系においては、下記の量は、外部の系により与えられるものとした。

$$\text{石炭投入量} : G_B$$

$$\text{火炉への空気流入量} : G_{L_3}$$

$$\text{火炉への流入空気温度} : T_{L_3}$$

#### (1) 燃料・火炉部

燃料供給系統および火炉モデルを図1.3.3に示す

$$\text{空気過剰率} \quad \lambda = \frac{G_{L_3}}{C_{BL} \cdot G_B}$$

火炉投入熱量 (Heat release)

$$E_B = H_u (G_{BF} + G_{BC}) + G_{L_3} \cdot C_{L_3} (T_{L_3} - T_{LR})$$

$$\text{浮遊燃焼} : C_B G_B - G_{BF} = T_{FF} \cdot \frac{d}{dt} \cdot G_{BF}$$

グレート上の燃焼 :

$$G_{BC} = K_{BC} \cdot F_{grate} \cdot W_0 \cdot S \cdot P(O_2)$$

$$M_{BC} = F_{grate} \cdot \gamma_{BC} \cdot S$$

$$\frac{d}{dt} M_{BC} = (1 - C_B) \cdot G_B - G_{BC}$$

$$W_0 = \frac{G_B}{2} \left[ \left( \frac{C_{SR}}{\gamma_{R10}} - \frac{C_{SL}}{\gamma_{L30}} \right) (1 - C_B) + \frac{2 C_{SL}}{\gamma_{L30}} \cdot \lambda \right]$$

$$P(O_2) = 21 \left[ 1 - \frac{C_{SR} (1 - C_B) / 2 \gamma_{R10}}{\left( \frac{C_{SR}}{\gamma_{R10}} - \frac{C_{SL}}{\gamma_{L30}} \right) (1 - C_B) + \frac{C_{SL}}{\gamma_{L30}} \cdot \lambda} \right]$$

火炉において

$$\text{ヒートバランス} : \frac{d}{dt} Q_{R1} = E_B - C_{R10} \cdot T_{R1} \cdot G_{R1} - E_{R1}$$

$$\text{熱伝達式} : E_{R1} = E_{R13} + E_{R14} + E_{R15}$$

$$E_{R13} = C_{R13} \left[ \left( \frac{T_{R1} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{R3} + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$E_{R14} = C_{R14} \left[ \left( \frac{T_{R1} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{M4} + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$E_{R15} = C_{R15} \left[ \left( \frac{T_{R1} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{M5} + 273}{100} \right)^4 \right]$$

残 留 热 量 :  $Q_{R1} = C_{R10} \cdot M_{R1} \cdot T_{R1}$

重量バランス :  $\frac{d}{dt} M_{R1} = G_{BF} + G_{BC} + G_{L3} - G_{R1}$

運動量バランス :  $P_{R1} = P_{R2} + K_{R20} \left( \frac{V_{R10}}{M_{R1}} \right) G_{R1}^2$

ガス状態方程式 :  $P_{R1} = \left( \frac{M_{R1}}{V_{R10}} \right) (T_{R1} + 273) \cdot R_{R10} - 10332.3$

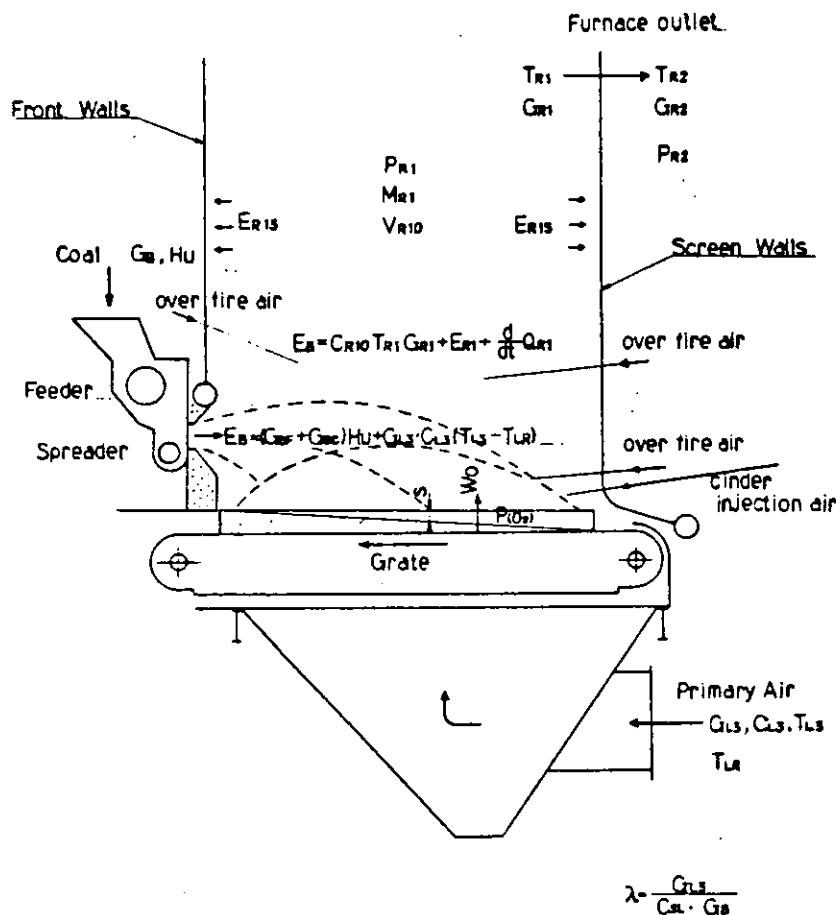


図 1.3.3 燃料供給系統及び火炉モデル図

(2) 他ブロックの代表基礎方程式

ブロック(i)における基礎方程式は、次の通りである。

$$\text{ヒートバランス} : \frac{d}{dt} Q_{Ri} = C_{Ri-10} \cdot T_{Ri-1} \cdot G_{Ri-1} - C_{Ri0} T_{Ri} \cdot G_{Ri} - E_{Ri}$$

$$\text{熱伝達量} : E_{Ri} = u_{Ri} \cdot (T_{Ri} - T_{Mi}), u_{Ri} = C'_{i0} \cdot G_{Ri}^{0.6}$$

$$\text{残留熱量} : Q_{Ri} = C_{Ri0} \cdot T_{Ria} \cdot M_{Ri}$$

$$\text{平均ガス温度} : T_{Ria} = \frac{T_{Ri-1} + T_{Ri}}{2}$$

$$\text{重量バランス} : \frac{d}{dt} M_{Ri} = G_{Ri-1} - G_{Ri}$$

$$\text{運動量バランス} : P_{Ri} = P_{Ri+1} + K_{Ri+10} \cdot \left( \frac{V_{Ri0}}{M_{Ri}} \right) \cdot G_{Ri}^2$$

$$\text{状態方程式} : P_{Ri} = \left( \frac{M_{Ri}}{V_{Ri0}} \right) (T_{Ria} + 273) \cdot R_{Ri0} - 10332.3$$

ここで、ブロック(i)においては、

変数:  $Q_{Ri}, T_{Ri}, G_{Ri}, E_{Ri}, T_{Ria}, M_{Ri}, P_{Ri}, u_{Ri}$

既知変数:  $T_{Ri-1}, G_{Ri-1}, P_{Ri+1}, T_{Mi}$

定数:  $C_{Ri-10}, C_{Ri0}, C'_{i0}, K_{Ri+10}, V_{Ri0}, R_{Ri0}$

となる。

上記の代表基礎方程式をもとにして、各ブロックでの状態を考慮して、各ブロック毎の基礎方程式が求められる。たとえば、該当ブロックでの、ドラフト損失が過小であり、滞留重量( $d/dt M_{Ri}$ )が無視されるような、スクリーン管部においては、重量バランス及び運動量バランスの式は、

$$G_{Ri} = G_{Ri-1}$$

$$P_{Ri} = P_{Ri+1}$$

となり、状態方程式の項は、省略されることになる。

(3) 誘引通風機部

$$V_{R8} = \frac{V_{R70}}{M_{R7}} \cdot G_{R7}, P_{R8} = f(V_{R8}) = a + b \cdot V_{R8} + c (V_{R8})^2$$

### 2.3.2 水-蒸気系

この系は、エコノマイザ部、上昇管部（これは更に火炉前壁、火炉側壁、スクリーン管部、対流蒸発管部と夫々の独立降水管に分割される。）、蒸気ドラム及び水ドラムにブロック化される。自然循環系の未知変数を図1.3.4に示す。

なお、エコノマイザ入口給水圧力及び温度は、外部の系より与えられるものとした。又、2相流部は、均質流（スリップなし）として扱った。

(1) エコノマイザ部

$$\text{運動量バランス(給水量)} : P_{in} - P_2 = \xi_1 \frac{G_f^2}{2 g A_1^2 \gamma_w}$$

$$\text{エネルギーバランス} : C_{pfs} \cdot M_1 \frac{dT_f}{dt} = 2 [C_{pfs} \cdot G_f (T_{in} - T_f) + E_1]$$

$$\text{ヒートバランス} : C_{M1} \cdot M_{M1} \cdot \frac{dT_{M1}}{dt} = E_{R7} - E_1$$

$$\text{熱伝達量} : E_{R7} = C'_{70} \cdot G_{R7}^{0.6} (T_{R7a} - T_{M1})$$

$$E_1 = f_1(G_f) \cdot \left[ T_{M1} - \frac{1}{2} (T_{in} + T_f) \right]$$

$$\text{エンタルピ} : H_f = f_2(P_2, T_f)$$

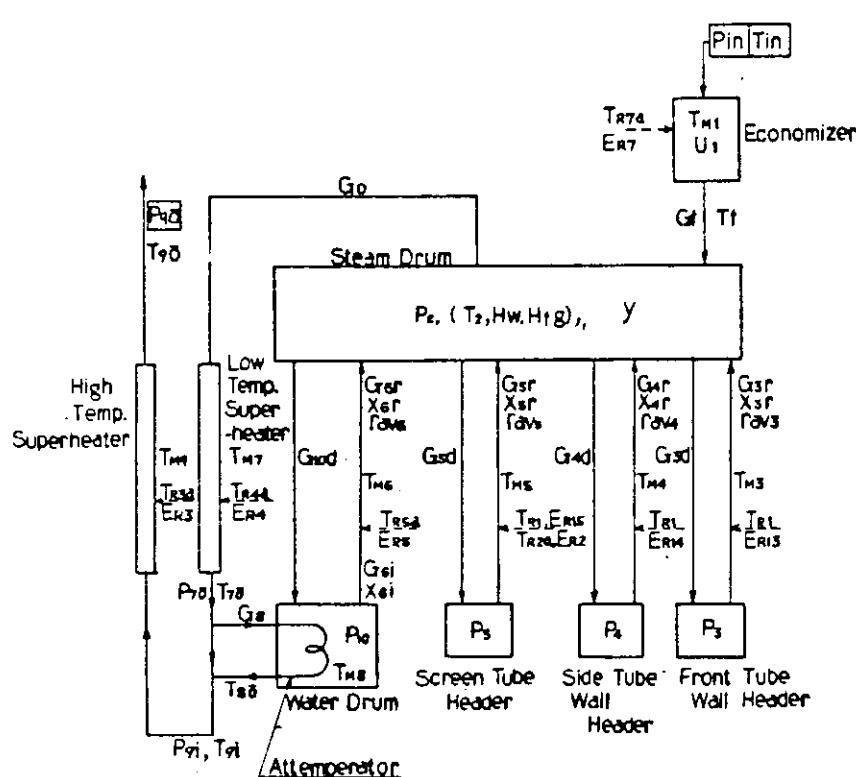


図 1.3.4 自然循環系の未知変数

(2) 上昇管部及び降水管

降水管運動量バランス :

$$P_i = P_2 - \left( f_{id} \frac{L_{id}}{D_{id}} + \xi_{idi} + \xi_{ids} + 1 \right) \frac{G_{id}^2}{2 A_{id}^2 g \gamma_w} + \gamma_w \cdot L_{id}$$

上昇管エネルギーバランス :

$$A_{ir}L_{ir} \frac{d}{dt} [\gamma_{avi} (H_w + \frac{x_{ir} + x_{ii}}{2} H_{fg})] = G_{id} (H_w + x_{ii} H_{fg}) - G_{ir} (H_w + x_{ir} H_{fg}) + E_i$$

上昇管運動量バランス :

$$\begin{aligned} P_i &= P_2 + \frac{L_{ir}}{A_{ir}g} \cdot \gamma_{avi} \frac{d}{dt} (\frac{G_{ir}}{\gamma_{ir}}) + \frac{1}{A_{ir}^2 g} \left\{ G_{id} (\frac{G_{ir}}{\gamma_{ir}} - \frac{G_{id}}{\gamma_w}) \right\} \\ &\quad + \phi_i \lambda \frac{L_{ir}}{D_{ir}} \frac{G_{ir}^2}{2g A_{ir}^2} + \gamma_{avi} L_{ir} g + \xi_{iri} \frac{G_{id}^2}{2g A_{ir}^2 \gamma_w} + \xi_{irs} \frac{G_{ir}^2}{2g A_{ir}^2 \gamma_{ir}} \\ \gamma_{avi} &= \frac{1}{v_{fg}} \cdot \frac{1}{x_{ir} - x_{ii}} \ln \left( \frac{\gamma_{ii}}{\gamma_{ir}} \right) \quad x_{ii} = 0 \rightarrow \gamma_{ii} = \gamma_w \\ \gamma_{ir} &= \frac{1}{v_w + v_{fg} x_{ir}} \quad , \quad \gamma_{ii} = \frac{1}{v_w + v_{fg} x_{ii}} \\ \phi_i &= 1 + \frac{1}{2} \left[ \frac{v_y}{v_w} - 1 \right] (x_{ir} + x_{ii}) \end{aligned}$$

管壁を通してのヒートバランス :

$$\begin{aligned} C_{mi} \cdot M_{mi} \cdot \frac{dT_{mi}}{dt} &= E_{ri} - E_i \\ E_{ri} &= C_{ri} \left[ \left( \frac{T_{ri} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{mi} + 273}{100} \right)^4 \right] + u_{ri} \cdot (T_{ria} - T_{mi}) \\ E_i &= u_{is} (T_{mi} - T_2) \end{aligned}$$

### (3) 水 ドラム

重量バランス :  $G_{10d} = \frac{n_6}{m_{10}} \cdot G_{6i}$

エネルギーバランス :  $E_8 = n_6 G_{6i} x_{6i} H_{fg}$

$$E_8 = u_{10s} (T_{m8} - T_2)$$

過熱温度低減器からの入熱は、蒸気発生に使われる。この蒸発量は少なく、ドラム内の密度変化はないものとする。

### (4) 蒸気 ドラム

サブ・クール状態で入ってきた給水 ( $G_f$ ,  $T_f$ ) は、瞬時に飽和蒸気により加熱され飽和水になると仮定する。

$$\begin{aligned}
\text{ヒートバランス} : & \left[ M_w \left( \frac{dH_w}{dP} \right) \right] \cdot \frac{dP_2}{dt} = \left[ \left\{ H_f - H_w + \frac{v_{2w}}{v_{2fg}} H_{fg} \right\} G_f \right. \\
& \quad \left. - \frac{v_{2v}}{v_{2fg}} \cdot H_{fg} \cdot G_o + \frac{v_{2w}}{v_{2fg}} H_{fg} G_r \right. \\
& \quad \left. - \frac{v_{2w}}{v_{2fg}} \cdot H_{fg} \cdot G_{do} + H_{fg} G_v \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{重量バランス} : & G_r = \sum n_i G_{ir} \quad i = 3, 4, 5 \text{ and } 6 \\
\text{上昇管} : & G_v = \sum n_i x_{ir} G_{ir} \quad i = 3, 4, 5 \text{ and } 6 \\
\text{降水管} : & G_{do} = \sum m_{id} G_{id} \quad i = 3, 4, 5 \text{ and } 10
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{ドラム水位} : & \frac{dy}{dt} = \frac{v_{2w}}{A_d} \cdot \frac{v_{2v}}{v_{2fg}} \left[ G_f + G_r - G_o - G_d \right] \\
M_w = A_d (y + y_o) / v_w
\end{aligned}$$

### 2.3.3 過熱器系

この系は、高温過熱器(2次S/H)、低温過熱器(1次S/H)及び過熱温度低減器より構成される。

#### (1) 過熱器

過熱器の代表基礎方程式は、

$$\text{重量バランス} : \frac{d\gamma_{s\text{out}}}{dt} = \frac{G_{s\text{in}} - G_{s\text{out}}}{V_s}$$

$$\text{運動量バランス} : P_{s\text{in}} - P_{s\text{out}} = \xi_s \frac{1}{2gA_s^2} \frac{G_{s\text{out}}^2}{\gamma_{s\text{out}}}$$

$$\text{エネルギーバランス} : V_s \frac{d(\gamma_{s\text{out}} \bar{H}_s)}{dt} = G_{s\text{in}} \cdot H_{s\text{in}} - G_{s\text{out}} H_{s\text{out}} + E_s$$

書きかえて

$$\frac{dT_{s\text{out}}}{dt} = \frac{\frac{1}{2}(G_{s\text{in}} + G_{s\text{out}})(T_{s\text{in}} - T_{s\text{out}}) + E_s / C_{ps}}{\gamma_{s\text{out}} V_s}$$

$$= \frac{G_p(T_{s\text{in}} - T_{s\text{out}}) + E_s / C_{ps}}{\gamma_{s\text{out}} \cdot V_s}$$

$$(G_p = \frac{1}{2}(G_{s\text{in}} + G_{s\text{out}}))$$

管壁を通してのヒートバランス：

$$C_{MS} M_{MS} \cdot \frac{dT_{MS}}{dt} = E_{RS} - E_s$$

$$E_{RS} = C'_{SO} \cdot G_{RS}^{0.6} (T_{RSq} - T_{MS})$$

$$E_s = C_{vs} G_b^{0.8} \left\{ T_{ms} - \frac{1}{2} (T_{sin} + T_{sout}) \right\}$$

(2) 過熱温度低減器

$$\text{重量バランス} : V_A \cdot \frac{d \gamma_{Aout}}{dt} = G_{ain} - G_{aout}$$

$$\text{運動量バランス} : P_{ain} - P_{aout} = \xi_A \frac{1}{2 g A_A^2} \cdot \frac{G_{aout}^2}{\gamma_{aout}}$$

$$\text{エネルギーバランス} : C_{ps} \cdot \gamma_{aout} V_A \frac{d T_{aout}}{dt} = \frac{C_{ps}}{2} (G_{ain} + G_{aout})(T_{ain} - T_{aout}) + E_{av}$$

管壁を通してのヒートバランス :

$$C_{MA} M_{MA} \cdot \frac{d T_{MA}}{dt} = E_{av} - E_s$$

$$E_{av} = K_A \cdot G_{aout}^{0.8} \left\{ \left( \frac{T_{ain} + T_{aout}}{2} \right) - T_{MA} \right\}$$

$E_s$  : 水ドラム内への放散熱量

この系においては高温過熱器出口圧力が外部の系より与えられるものとした。

## 2.4 計算結果の例

次の3つの場合についてプログラム確認計算を行い、その結果を図1.3.5から図1.3.13に示す。

- ② 投入石炭量( $G_b$ )に、基準負荷時の10%のステップダウンを与えた場合、
- ④ 蒸気流量( $G_D$ )に、基準負荷時の10%のステップダウンを与えた場合、
- ⑤ 投入石炭量( $G_b$ )及び蒸気流量( $G_D$ )に、それぞれ基準負荷時の10%のステップダウンを同時に与えた場合、

この計算に用いたボイラ並びに石炭の仕様は表1.3.3、表1.3.4に示すとおりであり、基準負荷時はこのボイラの最大連続負荷時とした。

表1.3.3 石炭仕様

石炭炭種	米国東部産/墨青炭
高位発熱量	6344 kcal/kg (1420 Btu/lb)
元素分析値(wt%)	C 67.4% H <sub>2</sub> 5.5% N <sub>2</sub> 1.3% O <sub>2</sub> 15.9% S 1.9% A <sub>sh</sub> 8.0%
工業分析値	固有水分 9.0% 灰分 8.0% 揮発分 33.9%

固定炭素 49.1 %  
 粒 度 分 布 : 最大粒径 40 %  
                   20 %以下のが 95 %  
                   6 %以下のが 40 %以下  
                   2 %以下のが 10 %以下

表 1.3.4 ポイラ仕様

蒸 発 量 :	最大連続負荷時	31.000	Kg/h
" :	常用負荷時	27.200	Kg/h
過熱器出口圧力		61	Kg/cm <sup>2</sup>
過熱器出口温度		490	°C
給水温度(エコノマイザ入口)		141	°C
空 気 温 度		38	°C
燃 料 消 費 量		3.870	Kg/h
燃 燃 方 式	スプレッダストーカ式		
通 風 方 式	平衡通風		
空 気 過 剰 率		30	%

本計算結果は、石炭だきボイラの動特性解析の第1ステップとして作成したオープンループ系のプログラム機能を確認したものであるが、グレート上燃焼量の特性についてはなお検討が必要であることが判明した。これについては引き次年度で解析をすすめるとともに、第2ステップとして制御系を加えて解析を行い更に重油だきボイラとの比較をする予定である。

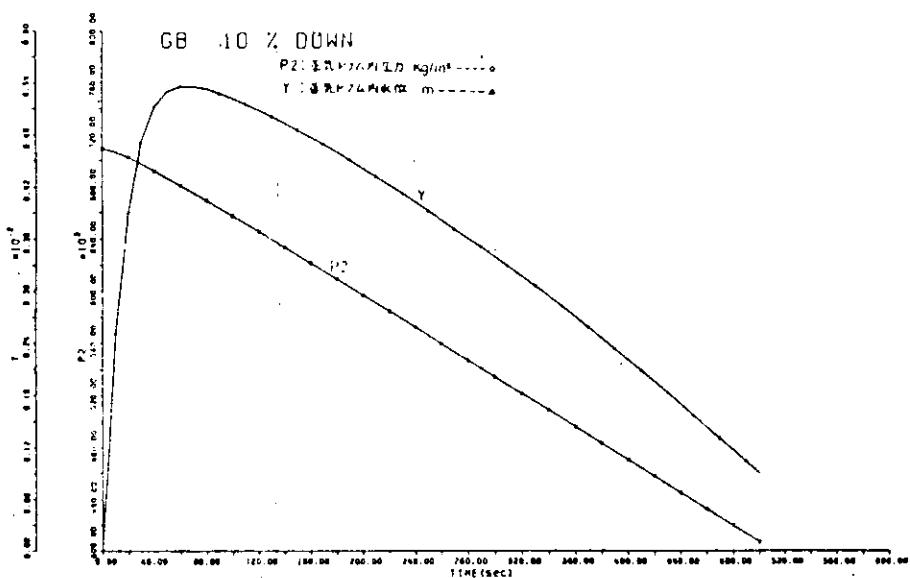


図 1.3.5

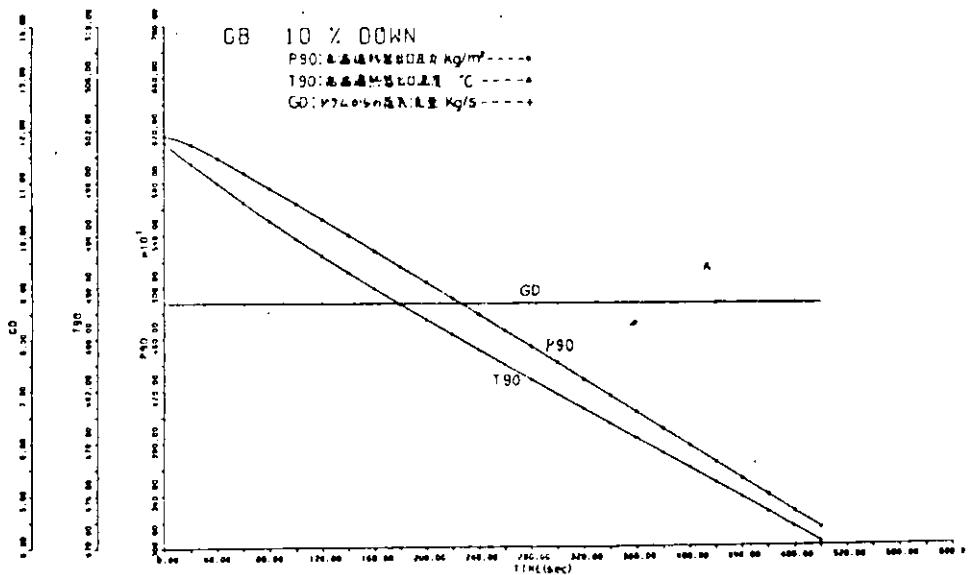


図 1.3.6

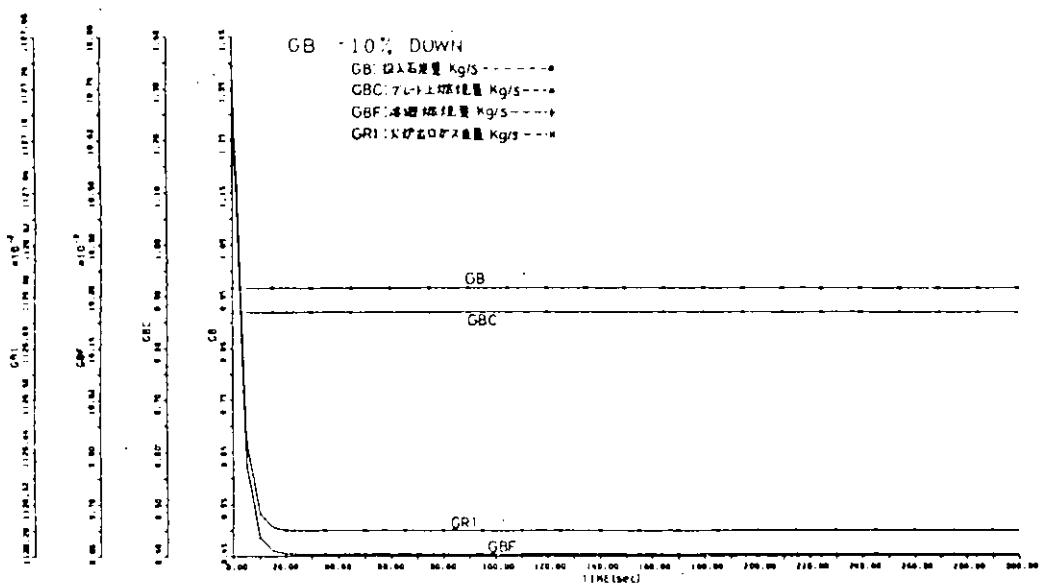


図 1.3.7

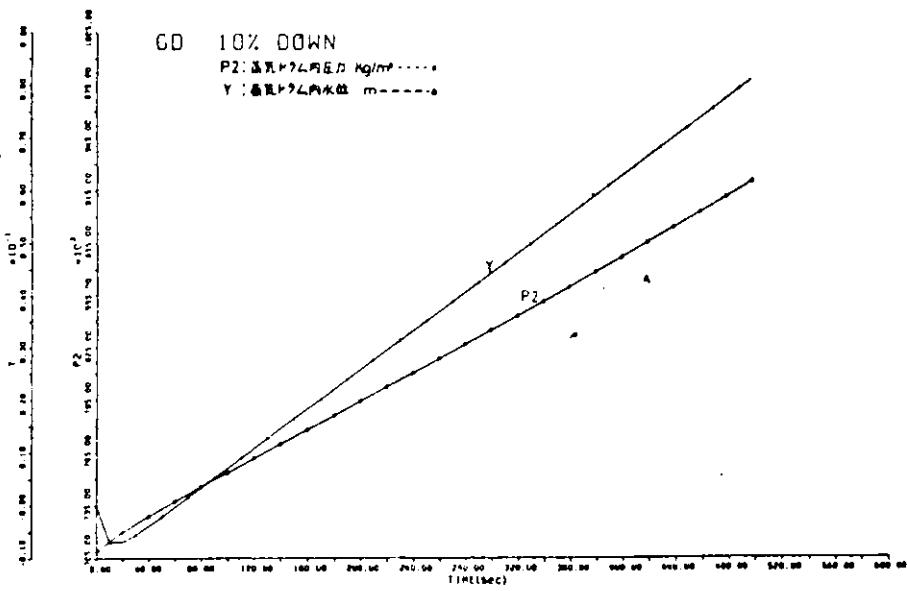


図 1.3.8

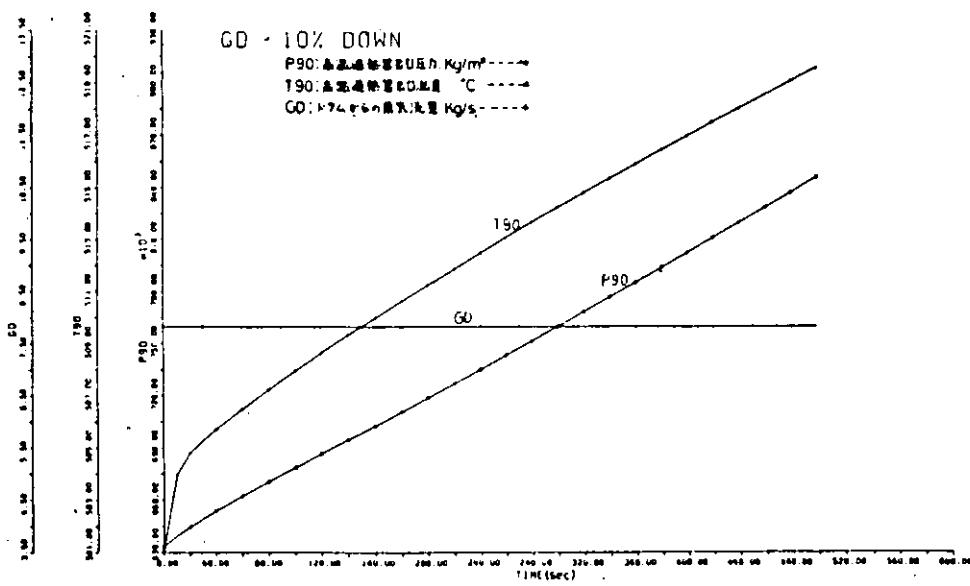


図 1.3.9

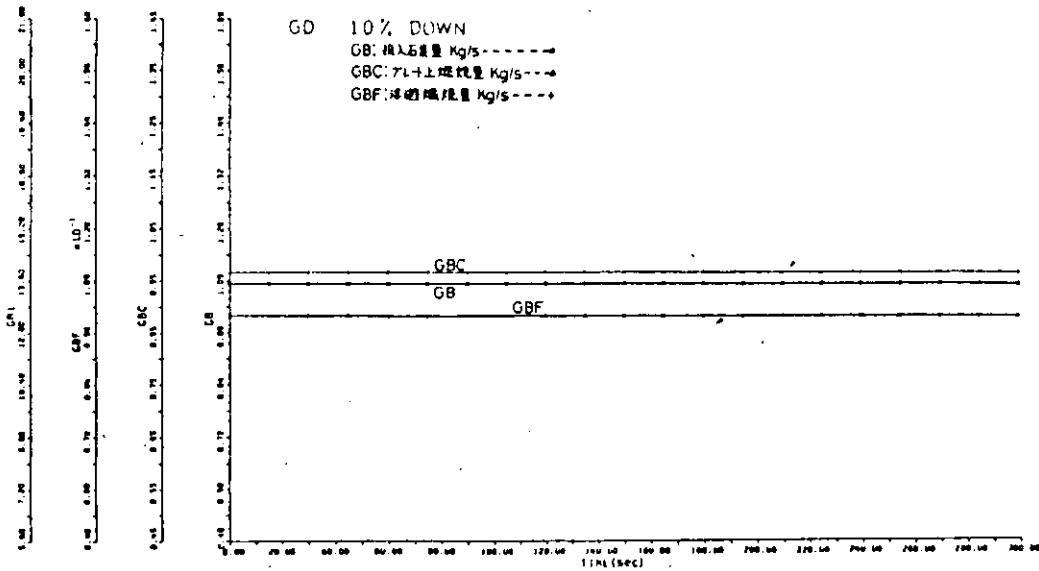


図 1.3.10

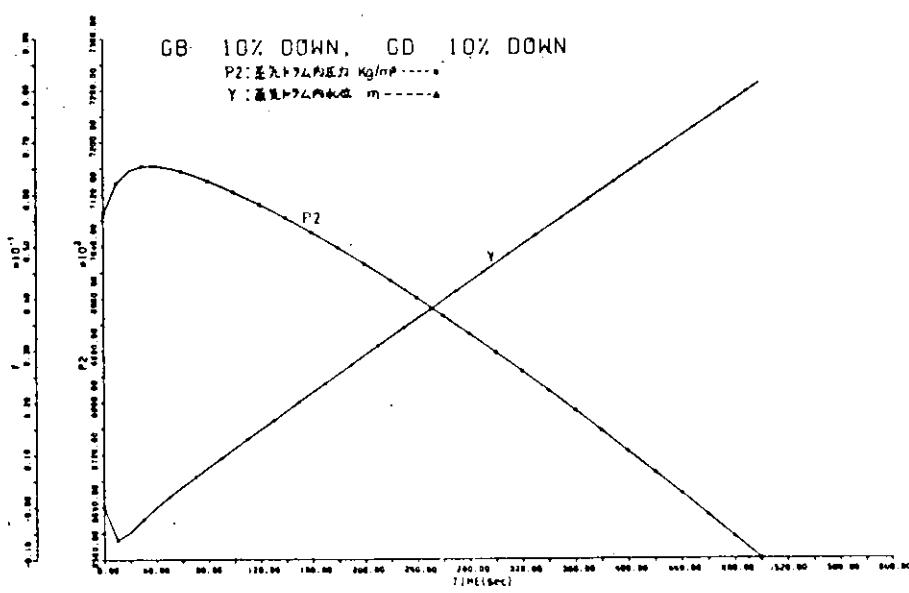


図 1.3.11

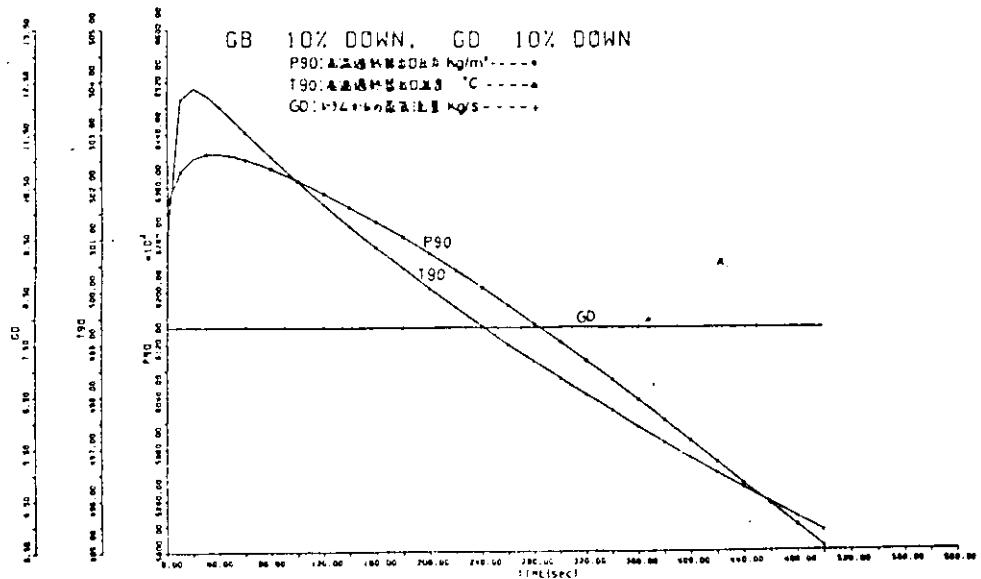


図 1.3.12

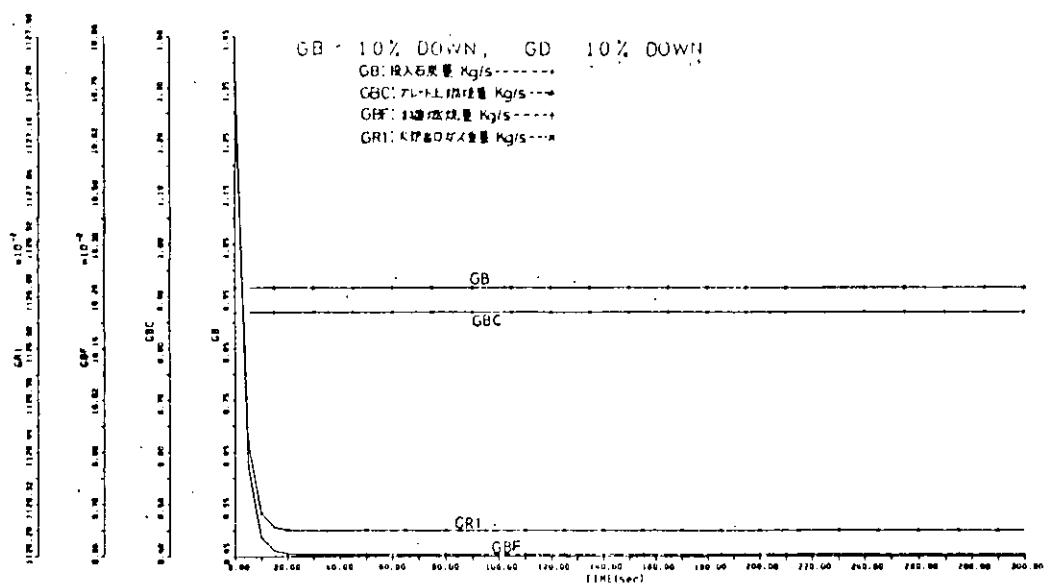


図 1.3.13

## 参 考 文 献

- Rydland, K., Öyvangt, K., and Glöersen, T.C.  
"A Mathematical Model for Dynamic Analysis of Boiler"  
Int. Marine and Shipping Conference, London 1973.
- Haraguchi, O., and Akasaka, N..  
"The Mathematical Model of a Main Boiler for a 60,000kW Container Ship,"  
Int. Marine and Shipping Conf., London, 1973.
- Whalley, R.  
"The Mathematical Model for a Naval Boiler"  
Measurement and Control, Vol.11, (1978~9)
- 古寺, 佐々木, 門田, 神崎  
“自然循環ボイラに関する水循環と水位の動特性”,  
日機論, Vol. 40, No. 337 (昭49. 9)
- Rikskeim, J.B., and Karlsen, R., Research Division, Det norske Veritas  
"Dynamic Properties of Coal Fired Propulsion Plants", 1981
- ロシュゲ著 「蒸 気 缸」 コロナ社

### 3. 余剰蒸気ダンプシステム

船用主ボイラの特徴は、その本来の目的を達成するため、比較的広い負荷範囲で安定かつ迅速な燃焼制御を要求される点にある。近代的石炭だき船は最新の重油だき船との対比において、前世代の石炭だき船には要求されなかった高度の自動化採用による乗組員定員の増加防止および船舶運航上の安全性確保などの前提条件を満足させる必要がある。しかしながら、石炭だき船の燃焼制御装置は重油だき船のそれに比較し、特に低負荷域での安定燃焼について特別の考慮を払う必要があると考えられている。現在の技術水準からみて、低負荷域では余剰蒸気の発生が避けられぬものとされ、これを処理するダンプシステムは自動燃焼制御装置を補完する重要な制御装置として位置づけられるであろう。

#### 3.1 重油だき船と石炭だき船の燃焼制御装置の比較

重油だき船では、燃料が液体であることにより

- (1) 燃料供給量の増減が容易かつ迅速にでき、広い制御範囲を持つ。
- (2) 雾化が容易であるため、低空気過剩率でも燃料と燃焼空気の予混合が可能である。
- (3) 複数のバーナを装備することにより、バーナの使用数制御が容易であるため、更に広い範囲での噴燃量制御が可能である。

などの利点があるため、船用の目的に応じた範囲での安定かつ迅速な負荷制御が可能であるとされ、自動燃焼制御装置（ACC）により重油供給量と燃焼空気量を制御するか、または必要に応じて自動バーナ本数制御装置（BNC）をこれに付加することで想定される大部分の負荷変動域に対し、安全弁を作動させることなく対処可能であるとされている。

一方、石炭だき船においても、ストーカだきボイラの場合には、その給炭量と、主として一次空気量を制御することにより重油だき船と類似の負荷制御をすることは可能であるが、

- (1) 大格子への石炭散布量が限度以上となった場合、散布量の不均一による大格子の部分焼損が考えられるため、給炭制御には下限がある。
- (2) 石炭の燃焼速度を支配する一次空気の拡散抵抗が炭層によりバラツキがあるため、一次空気の絞り込みにも下限がある。
- (3) 重油だき船のバーナ本数制御に相当する装置をストーカだきボイラで実現するには構造的な困難を伴う。

そのため、自動燃焼制御装置で安定した燃焼が実現できる範囲は全負荷の既ね $\frac{1}{3}$ ～ $\frac{1}{4}$ であると考えられている。また極めて短時間での負荷低下、例えば主タービンの危急減速または非常停止を想定した場合、そのような事態が発生する以前に火格子上に散布された石炭は赤熱石炭層として燃焼を継続する。

事態発生と同時に一次空気をその許容下限まで制限した場合でも、火格子上の残存赤熱石炭層の温度が定常化するまではボイラへの過剰入熱が継続することになる。従って、急速遮断弁ではなく瞬時に入熱を遮断できる重油だき船と比較して、ストーカだきボイラの入熱遮断特性は劣るものと考えられる。

このストーカだきボイラ燃焼制御装置における安定制御範囲の時間遅れの存在は主蒸気圧力の過上昇を招き、場合によっては安全弁の作動に至ることとなる。

安全弁による蒸気の大気放出はボイラ水の損失となる他に、安全弁の頻繁な作動は弁の密封性に障害を起す可能性が大きく、余程の非常事態でない限り、安全弁が作動しないシステム構成であることが望ましい。このためには、安全弁設定圧力の下方で作動する逃し弁（ダンプ弁）を主蒸気系統に装備し、主蒸気圧力過上昇の際には、この逃し弁により蒸気を、主タービンをバイパスして復水器に導き、余剰入熱を処理する必要がある。

このようなダンプシステムが必要であるかどうかは、究極的にはボイラ負荷の変動（減少）にボイラの熱入力制御がどれだけ厳密に追従可能であり、安全弁吹き出しの機会が現在一般に容認されている程度に制御可能であるかどうかに関わる問題ではあるが現在の技術水準からみて、何等かの補完システムが必要と想定されている以上、ダンプシステムを装備するとすれば、それはどのようなものであるべきかを検討しておくことが必須と考えられる。

### 3.2 各主要海事協会の動き

主要海事協会の石炭だき船に関する規則(案)または検査要領などで求められている低負荷域における燃焼安定に対する要求を列挙すれば次の通りである。

日本海事協会(NK)： 低負荷域におけるボイラの燃焼の安定を図り、かつ、予想される余剰蒸気の処理について特別の考慮を払うものとする。

米国海事協会(ABS)： Boiler intended to operate without manual supervision are to comply with applicable requirements of 41.41 through 41.51 of the Rules and the boiler control system, including the steam dump system, is to operate automatically. The boiler controls are to provide the capability to safely satisfy the steam requirements demanded from the boiler(s) under all conditions ranging from maximum steam generation to maneuvering while maintaining the fuel/air mixture within the limits required for continuous combustion.

The boiler control system is to be capable of operation during maneuvering such that the safety valves will not lift: it is generally expected that a steam dump system will be fitted to provide this capability.

ノールウェイ海事協会(DnV)： When a combustion control system is fitted, the steam pressure is, over the entire control range, to be kept within limits appropriate to the steam consuming machinery.

ロイド船級協会(LRS)：“Preliminary Guidance Notes for the Burning of Coal in Ships Boiler”にはこれに類する記述は見当らない。

### 3.3 余剰蒸気ダンプシステムに関するアンケート調査結果

余剰蒸気ダンプシステムに関し、各造船会社委員に、またシステムの主要構成要素と考えられるダンプ弁と緩熱器に関し、各関連メーカに対してアンケート調査を実施した。

要約は次の通りである。なお、アンケート調査とりまとめ結果の原紙は資料1.3.3「余剰蒸気ダンプシステムアンケート調査結果」として(社)日本造船研究協会事務局が保管している。

(1) 主ボイラはすべて2缶方式としており、低負荷時も2缶運転を続けると回答したものが5社あり、

荷役および停泊時は 1 缶運転 1 缶休止としたものが約半数となっている。

- (2) ダンプ弁のもつべき静的処理能力については具体的に数字を挙げて回答したものと、応すべき状態の変化で回答したものに二分されるがボイラ定格蒸発量の 30% から主タービン全負荷状態でタービンが危急停止しても過熱器安全弁が作動しない容量と回答されたものまで、かなりの幅がある。
- (3) 余剰蒸気の抽出点については直接主蒸気管からとするものが 3 社、内部緩熱器経由とするものが 4 社である。直接主蒸気管からとするものは、内部緩熱器が大きくなりすぎる、外部緩熱器のみで処理するより計画する方が設計の自由度が大きいなどを理由として挙げている。また、内部緩熱器経由とするものは、高温高圧機器および配管を少くする、内部緩熱器の方が安定した減温制御が可能などを理由として挙げている。
- (4) 余剰蒸気を最終処理する復水器は主復水器を兼用すると回答したものが 6 社で、大気圧の補助復水器で処理すると回答したものが 1 社である。補助復水器を使用するのは、この社のプラント構成では主ターボ発電機の排気を主復水器で処理するよう計画しているため、主復水器の構造上、大径の余剰蒸気ダンプ管を主復水器に接続するのは困難であるとしている。
- (5) 余剰蒸気ダンプシステムの全体構成に対する回答は各社各様であるが、これを集約して骨組を示したもののが図 1.3.14 の(a)および(b)である。

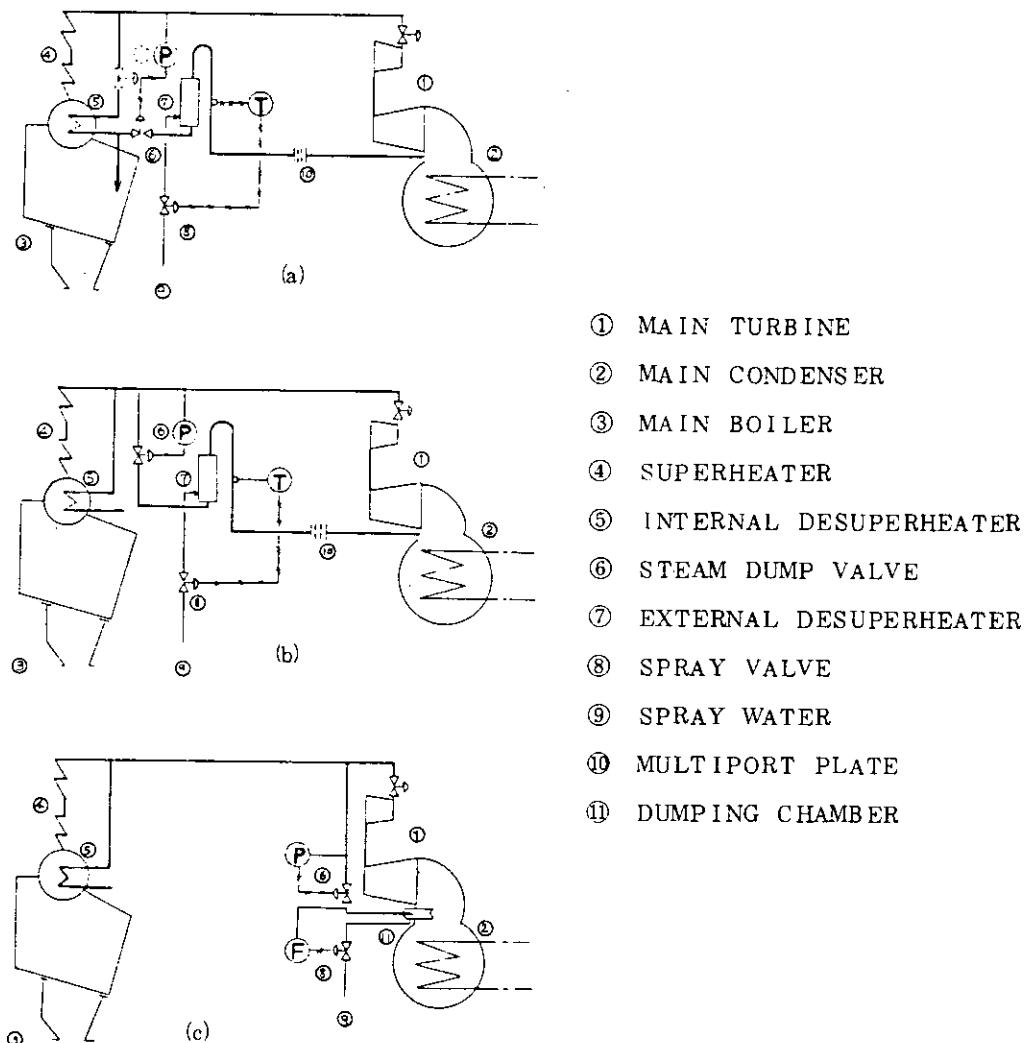


図 1.3.14 過剰蒸気ダンプシステム系統図

- (6) 制御弁メーカは余剰蒸気ダンプシステムに類似したシステムとして、陸上産業用タービンのタービンバイパス制御システムを挙げ、その納入実績は多数あるとしている。
- 船用の余剰蒸気ダンプシステムに関しては、必ずしも実績は多くないが、システムの設計圧力および温度範囲のみでいえば船用の60kgf/cm<sup>2</sup>～510kgf/cm<sup>2</sup>級に比較して一層高いレーティングの陸上ボイラで類似実績があるため、船用でも応じ得ると回答している。
- (7) 制御弁メーカは蒸気処理の手順を、減圧してのち減温するのが一般的と考えており、うち1社は減温してのち減圧する方法はできる限り避けるとしている。
- (8) 減圧弁は一次側圧力制御、二次側圧力制御または両者の組み合せなどシステムによって決定すべきであるが二次側圧力制御とする例が多いと回答されている。
- (9) 減温給水弁の作動に関しては、減圧弁の作動に対し、給水先行制御を行う場合もあると1社が回答している。ただし、給水先行制御を必要条件とはしていないと判断できる。
- (10) 参考のため、アンケート調査で入手した資料から緩熱器メーカーが要求する配管要領をまとめると次の通りである。

緩熱器形式 <sup>*1</sup>	A社 (2)	B社 (1)	D社 (3)	E社 (2)
下流側直管長さ <sup>mm</sup>	<sup>*2</sup> ≥10	5D～8D	<sup>*3</sup> —	≥4.6
温度検出点までの距離 <sup>mm</sup>	≥10	≥10D	<sup>*4</sup> ≥6	≥12.2

注記 \*1 形式は(1)減圧および減温同時の複合弁によるもの、(2)減温のみ単独に行い、ミキシングチャンバを持たないもの、(3)減温のみ単独に行い、ミキシングチャンバを持つものを示す。

\*2 上流側にも10D(D:配管径)を要す。実績より配管は水平であることが望ましい。

\*3 直管であることを要求しない。

\*4 蒸気の過熱度および流速などによって決まる。立上り管や曲り管の存在によっても限定される。

- (11) 同様にダンプ蒸気圧力と緩熱注水の所要圧力差をまとめると次の通りである。

噴霧方式	A社 蒸気噴霧	B社 圧力噴霧	C社 圧力噴霧	D社 圧力噴霧
要求差圧(kgf) <sup>*1</sup>	0.1～5.0	1～3.0	≥2	≥2

注記 \*1 D社をのぞき、注水制御弁を必要とする。上記に示す数値は緩熱器のみの必要差圧で、注水制御弁の必要差圧を含まない。

\*2 減圧・減温複合弁方式で注水は処理蒸気自身の噴流で霧化混合される。

以上のようなアンケート調査から、余剰蒸気ダンプシステムを計画するにあたって考慮すべき項目をその重要度が高いと考えられるものから順に列挙するとすれば次の様になる。

- (1) 予想されるダンプ弁の作動条件をどの様に設定するか、特にボイラ定格蒸発量とダンプ弁の計画流量をどう関係づけるか。ダンプ弁が作動した後、時間の経過に従ってその流量は如何に変化すべきか、また、ボイラ動特性との整合性があるか。
- (2) 余剰蒸気の抽出点をどこにとれば最も安全で経済的か。
- (3) 余剰蒸気を最終処理する復水器側の受入可能な蒸気条件をどの様に設定するか。高エンタルピの余剰蒸気を復水器で受け入れた際に復水器内で何が起るか、また、何を考えなければならないか。
- (4) ダンプ弁の性能および構造は如何にあるべきか。

- (5) 外部緩熱器は必要か。必要とすればどの位置に装備すべきか。給水は如何にすべきか。
- (6) システムの全体構成はどのようにすべきか。

### 3.4 調査結果の考察

#### 3.4.1 ダンプシステムが持つべき蒸気処理能力－静的検討

船用タービンプラントの負荷変動幅と時間当たりの負荷変動率を通常操作と危急操作に分けて考察すると、通常操作のボイラ負荷変動範囲は純粹停泊から主タービンの最大出力運転まででありほぼ $10 \leftrightarrow 100\%$ 負荷に相当する。このうち $10 \leftrightarrow 40\%$ 負荷は入出港あるいは狭水道通過時の出力範囲であり、頻繁な負荷変動が要求されるため、変動に対するプラントの応答も十分迅速であることが必要となる。一方、 $40\%$ 以上から $100\%$ 負荷に至る間は大洋航海に移行する段階であるため、毎分 $1\%$ 前後の負荷変動率で緩かにプログラム増速されるのが通例である。

危急操作の負荷変動幅は主タービンの危急停止を考えれば理論上 $100 \rightarrow 10\%$ 瞬時となるが、この様な危急操作には油だき船の燃焼制装置でも一般的に追従不可能であり、一時的な安全弁の吹き出しは止むを得ぬものとして実用上認められているので石炭だき船の場合も同程度の範囲、即ちこの様な事態での安全弁吹き出しとその継続時間、換言すればこの様な事態でのボイラ水の大気放出損失がほぼ油だき船の場合と大差ないならば許容されると言い得よう。

以上より、ダンプシステムの静的能力としては、マニュバリング域の最大出力時に主タービンが危急停止したときでも、安全弁が作動しない程度、即ち $30\%$ 強の負荷変動を考慮しておくのが現実的であろうと思われる。

この場合、主タービンが危急停止した後に、プラント全体を作動状態に保持するためのボイラ負荷は定格の約 $10\%$ と想定しているので、具体的な数値については個々のプラントの実情に合わせて決定する必要があるが、全体に幾分の余裕を持たせて、ダンプシステムの最大流量は主ボイラ定格蒸発量の $35 \sim 40\%$ としておけばさし当り十分に安全、かつ、実用的な目安と言うことができよう。

ダンプシステムの能力を上記のように想定したとすれば、このシステムはマニュバリング域でかなり頻繁に作動する他、通常航海時においても全く予告なしに作動を要請されることとなり、ダンプシステムは、それが装備される限りにおいて自動作動とすることが必要となる。

ダンプ弁の容量を設定するに際し、その最大流量とともに考慮しておくべきことは、弁の固有流量特性とシステムに組入れられた時に發揮し得る動的な有効特性であり、この点からの考察はボイラの動特性解析と組み合わせて検討されるべきであり、将来の課題とするが、ダンプ弁として定性的に言及すればいわゆる「利きの早い」弁特性を要求されるであろうことは論をまたない。

#### 3.4.2 余剰蒸気の抽出点

アンケート調査によれば復水器で受入れ可能な蒸気温度の上限は $200^{\circ}\text{C}$ である。 $510^{\circ}\text{C}$ 級の過熱蒸気をこの温度まで減温して復水器に導くための蒸気抽出点としては

- (1) ボイラ内部緩熱器を経由して抽出
  - (2) 主蒸気管からの直接抽出
- の二つが考えられる。

$60\%$ 級のタービンプラントにおけるボイラドラム内ボイラ水温度は $280^{\circ}\text{C}$ 以上であるから余剰蒸気を上記(1)により抽出した場合でも、内部緩熱器のみでは復水器で受入れ可能な温度まで減温できず、外部緩熱器を後置することが不可避であり、システム構成はより複雑となる。その反面、システムの最高温度レベルが低下することにより、構成要素の使用温度条件が緩和され、コストの安い材料を使用することが可能となる。

ちなみに、NK規則によれば蒸気温度 $400^{\circ}\text{C}$ 以下の管およびその付属品として炭素鋼の使用が

認められており、内部緩熱器でこの程度まで減温しておけばシステムの構成要素に対して高価な合金鋼を使用する必要がない。

ただし、内部緩熱器を減温装置として使用する場合に考慮を要する点は、想定したダンプ量がボイラ定格蒸熱量の35～40%とかなり大きいのでドラム寸法がそれに適したものであること、また、通常運転時とダンプ時の緩熱器流入蒸気量の差が大きく、従って緩熱器出口温度も変動するので、緩熱器で駆動する補機、例えば、主給水ポンプタービンなどがある場合にはこれを考慮に入れる必要がある点などとなろう。

一方、上記(2)の主蒸気管から直接抽出して、外部緩熱器に導く方法は、システムの単純化が計れ、ボイラ本体からは独立の機器となるので設計上の自由度が大きい利点がある。反面、緩熱器を含め、高温高圧仕様の構成要素が増し、外部緩熱器の容量は(1)より大となる。ダンプ弁に至る管装置の規模を比較するため、次の様な蒸気条件で両者を比較してみる。

	圧力 (p ata)	温度 (t °C)	エンタルピ (h Kcal/Kg)	比容積 (v m³/Kg)	蒸気過熱度 (θ °C)
過熱蒸気(s)	62.5	515	825.5	0.05685	236
緩熱蒸気(d)	57	400	761.4	0.05122	129

処理すべき余剰熱量は抽出点には無関係なので過熱蒸気としての体積流量を100として緩熱蒸気としての体積流量をその比で表現すると

$$\frac{0.05122}{761.4} \times \frac{825.5}{0.05685} \times 100 = 97.7\%$$

となり、差は2%強である。このことは、管内の蒸気流速を(1)と(2)で同一に計画した場合、ダンプ弁に至るまでの管口径は両者間でほとんど差がないことを示す。

また、ダンプ弁の寸法は、 $4p \geq p_1/2$  のとき容積係数(Cv値)を概算する式

$$Cv = \frac{(1 + 0.0013\theta)}{11.78p_1} \times W$$

ただし、W : ダンプ蒸気の重量流量 (Kg/h)

$p_1$  : ダンプ弁の一次側圧力 (ata)

$\theta$  : 過熱度 (°C)

および、処理すべき余剰熱量は抽出点に無関係であること、すなわち

$$825.5 \times W_s = 761.4 \times W_d$$

ただし、 $W_s$  : ダンプ過熱蒸気の重量流量 (Kg/h)

$W_d$  : ダンプ緩熱蒸気の重量流量 (Kg/h)

この両式より

$$\begin{aligned} \frac{Cvd}{Cvs} &= \frac{(1 + 0.0013 \times 129)}{57} \times \frac{825.5}{761.4} \times \frac{62.5}{(1 + 0.0013 \times 236)} \times 100 \\ &= 1.06 \end{aligned}$$

となり、上記(1)方式の場合はCv値で6%大きい寸法の弁を採用することになる。

以上の両者における特質をまとめると次の様になる。

抽出点	内部緩熱器	外部緩熱器	管			弁など		
			口径	材質	複雑度	口径	材質	温度標準
過熱蒸気	小	やや大	ほぼ同	合金鋼	簡単	小	合金鋼	高
緩熱蒸気	非常に大	小		普通鋼	やや複雑	やや大	普通鋼	低

これによればダンプシステムにおいて抽出点をいずれに選んでもコスト的には大差がなく、結局は、システム内の最高温度・レベルのちがいがシステムとしての安全な作動にどのような影響を及ぼすかの評価にかかるものであると言うことができる。アンケート回答における各社のバラツキは、その様な設計者の配慮を反映したものと解釈される。

### 3.4.3 復水器

前項で記述した通り、余剰蒸気は、外部緩熱器により、または内部緩熱器と外部緩熱器の組み合せにより減温されて復水器に導かれる。この減温処理は系内で発生した余剰入熱により発生した高エンタルピレベルの蒸気を復水器で受け入れ可能なエンタルピレベルまで低減することを目的としている。減圧・減温処理をどのような方法で行う場合でも、発生した余剰入熱は最終的に復水器に導かれ、冷却海水との熱交換により系外に放出されねばならない。

このような目的で使用される復水器を計画する際に考慮すべきは、流入する余剰入熱をいかなるエンタルピレベルと流速レベルで復水器内に受け入れるべきかということになる。

即ち、

- (1) 復水器内圧の許容値
- (2) 復水器構成部材の温度上昇限界、熱応力レベルの許容値
- (3) 蒸気流入速度の上限、応力レベルの許容値
- (4) 衝撃腐食、振動および騒音発生の防止

などに配慮する必要がある。

復水器内圧の保持について詳細な考察をするには、特定のタービンプラント構成を想定する必要がある。しかし、極めて概略的に言えば、通常航海時における主復水器流入排気のエンタルピを  $560 \text{ kcal/kg}$  とし、余剰蒸気のエンタルピは  $826 \text{ kcal/kg}$ 、またその最大量はボイラ定格蒸気の 40%と仮定すれば、余剰蒸気処理に際して主復水器に流入する熱量は、通常航海時における流入量の大略 60%程度となる。

主復水器の冷却海水量は計画通り確保されており、流入した余剰蒸気は均一に冷却管群に拡散されているとすれば、主復水器内圧が安全な範囲に保持されているか否かはその時の流入熱量によるので、余剰蒸気処理における流入熱量が上記の仮定通り定格の 60%程度であれば、計画時の真空度を保持できる。また、仮に通常航海時、瞬時にデッドストローまで減速するような、非常に例外的な操作を想定し、主タービンの排気に加え、ダンプ蒸気も同時に復水器に流入し、その合計流入熱量が計画のほぼ 120%となった状態を想定したとしてもこれによる凝縮温度の上昇は  $2^{\circ}\text{C}$  以下であり、これを真空度の低下に換算すれば  $10 \text{ mm Hg}$  以下であるので真空度保持の面でダンプ蒸気の流入は本質的な問題にならぬと言える。

復水器に余剰蒸気を導くときの最高許容温度については管束部と胴側に分けて考える必要がある。

余剰蒸気の管束入口部分における蒸気流速は相当大きく、また位置により不均一なものと予想するすれば、一部分では冷却管外表面の管壁温度がほぼ流入蒸気温度と同一程度となる可能性もあると考えられる。

図 1.3.15 は各種材料の経済的使用温度範囲を示したものである。図よりみて銅合金およびアルミニウム合金では  $200^{\circ}\text{C}$ 、キュプロニッケルでは  $350^{\circ}\text{C}$ 、また図には示されていないがチタニウムでも  $350^{\circ}\text{C}$  付近が上限と考えられるのに対し、アンケート調査によれば蒸気温度で  $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$  の範囲に回答が集中している。最終的には冷却管の材質によりおのずから決って来ると考えられるが管束側から許される管壁温度は  $200 \sim 350^{\circ}\text{C}$  の範囲となろう。

管束側から上記のような温度制限が与えられるとすれば鋼製胴側として考慮すべきはこの温度範囲での熱応力レベルを検討し、ダンプ蒸気入口管台および胴膨脹継手の構造をそれに応じたものとすることであろう。

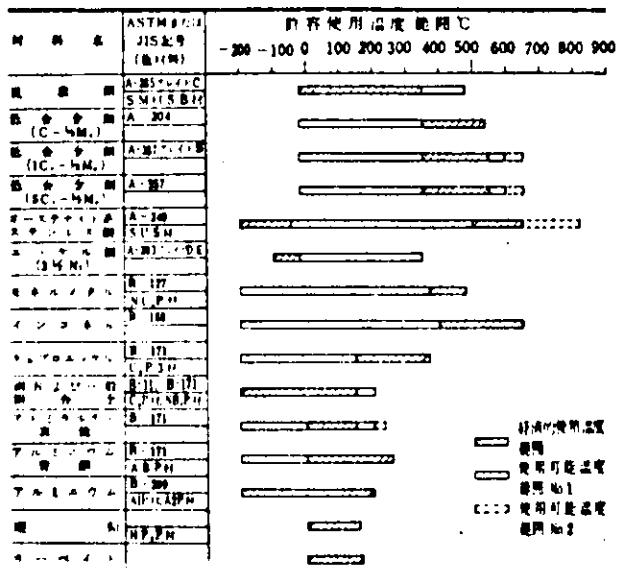


図 1.3.15 材料の経済的使用温度範囲  
(出典: 「新版熱交換器」落合, 日刊工業新聞)

蒸気流入速度に対するアンケート調査によれば制限速度は  $30 \sim 200 \text{ m/sec}$  とかなり幅のある回答となっているが、これは制限速度の設定場所がまちまちである点に起因しているものと思われる。一般的な復水器における蒸気流入速度は排気入口で  $40 \sim 100 \text{ m/sec}$ , 管束入口で  $35 \sim 45 \text{ m/sec}$  とされているので、余剰蒸気導入に際しても、この制限範囲内とすることが一つの目標となろう。

振動およびそれに伴う騒音発生についてはカルマン渦列発生による管束の共振防止に意を払う必要がある。

以上の考察は、余剰蒸気を処理する復水器として主復水器を兼用するものとして検討している。これは余剰蒸気を主復水器で処理できるようすれば別途のダンプ専用復水器およびその循環水泵を必要とせず設置費用および運転費用の面で多大の利点があるためであるが、例えば主復水器をターボ発電機の排気処理にも使用するようなプラントにあっては主復水器に接続される排気入口の配管に困難が生じる場合もあり得るので、特定のプラントにおいては別置のダンプ専用復水器を計画する必要が生じる場合もある。

#### 3.4.4 ダンプ制御弁

ダンプ弁の作動範囲は ACC 設定圧力と安全弁設定圧力の中間で適当な幅を持たせることになるがアンケート調査によれば ACC 設定圧力と安全弁設定圧力の差は 2~3% であり、ダンプ弁の安定した作動を確保するため、これらの上下にそれぞれ 0.5~1.0% の差をとり、ダンプ弁の作動範囲、すなわち弁開から全開までの蒸気圧力幅を約 1.0% としたものが多数を占めている。一方、ダンプ弁の作動範囲が 1% 以内と小さい場合には、蒸気流量の瞬時変動、換言すれば圧力検出点に至るまでの管路抵抗の瞬時変化が無視できなくなるのでダンプ弁の圧力検出点は直接ボイラードラムよりもとする要望を制御弁メーカーが出している点に注目される。ただし、船用主ボイラは過熱蒸気圧力一定制御で運転されるのが一般的であり、この制御方式では過熱蒸気流量の変化によりドラム圧力は変動するので、この制御弁メーカーの要望は簡単には実現不可能で、実現するには、蒸気流量を検出して関数発生器で処理した信号をダンプ制御弁の調節計に加入させるなどの手段が必要となる。

制御弁の内部構造としては漏洩を少くする点から単座形式とし、点検および部品交換を容易にし、かつ低騒音を配慮してマルチポートケージ弁などが適していると回答されている。

弁駆動装置は空気式ダイヤフラム、ピストンまたは電動と多様であるが、これは弁全体の構成と要求仕様の実現とに密接な関係があるため、弁メーカーの見解に従うべきであろう。ただし、いずれの場合にも要求される開弁速度は実現できるとしている。

ダンプ弁作動の 1 次信号は上記に述べたように主蒸気圧力となるが、2 次信号として主タービンの運転モードスイッチのマニューバリング位置信号を加入させるとした例、あるいは危急停止および減速信号を加入させるとした回答が多数を占めているが、これは 3.4.1 項の蒸気処理能力の設定と整合性を持たせた配慮が必要となろう。

#### 3.4.5 外部緩熱と給水

3.4.2 項に記述したとおり、ダンプ蒸気を復水器で処理するには、内部緩熱器を利用すると否とにかかわらず、減温水注入による外部緩熱を必要とする。

アンケート調査によれば、ダンプ用外部緩熱器は低圧タービンによる非常航走用外部緩熱器と兼用にすることもあり、プラント構成上、このような兼用が可能であれば、からずも専用のダンプ用外部緩熱器は必要でない。

減温水注入による外部緩熱の方法としては

- (1) 減圧および減温同時の複合弁によるもの
- (2) 減温のみ単独に行い、ミキシングチャンバを持たないもの
- (3) 減温のみ単独に行い、ミキシングチャンバを持つもの

などが考えられる。(1)および(2)は蒸気と減温水のミキシングチャンバを持たず減温水の蒸発は減温器下流側の配管内で行われ、減温水の完全蒸化を行わせるためには減温器下流側に十分な長さの直管部を必要とし、緩熱温度が安定するまでには更に長い配管を必要とするのが一般的である。(3)は減温器自体がミキシングチャンバを構成するようにしたもので緩熱温度は比較的短かい距離で安定する。船用緩熱器は配置上の制約を受ける場合が多いため、従来から(3)が最も好まれ、造船各社のアンケート調査結果では、この(3)方式を想定して回答しているものが多い。

3.4.1 項で想定したダンプ弁容量であれば緩熱器として要求される制御範囲は、ダンプ専用緩熱器の場合で30:1程度となり、最適設計をすればこの程度の制御範囲は保証されよう。ただし、ダンプ用緩熱器を他の目的と兼用とする場合はこれ以上の制御範囲を要求される場合もあると考えられるので注意を要する。

減温水制御弁は緩熱器二次側の温度を一定に制御することになるが、注水先行制御を行わせるため、ダンプ弁開弁信号により減温水制御弁を強制作動させ、一定時間後に温度制御に切換える方式を採用する場合があると回答された例が二つある。これは主タービンの危急停止などによるダンプ弁急速作動に対して減温水制御弁が即応できるようにするためのもので陸上プラントにおけるタービンバイパス制御では通常のプラクティスとして採用されている。

アンケート調査によれば、減温注水は主給水ポンプによるとしたものと主復水ポンプによるとしたものが半ばしているがその優劣を判断するためには更に具体的なシステム構成を想定して比較する必要があろう。一般的に言えば、主給水系統の枝管による場合は高圧部での注水が可能であるが高温のため注水量は多くなる。一方、復水管系統の枝管による場合は低温であり注水量は少量でよいがダンプ蒸気が十分膨脹した低圧部で注水することになる。

#### 3.4.6 ダンプシステムの全体構成

アンケート調査結果の項でのべた通り、システムの全体構成としても、もっとも典型的なものは、図1.3.2の(a)および(b)である。(c)はかならずしもアンケート調査結果によらないが、減温注水を低圧ポンプで行う場合の一試案として示す。このシステムの場合はダンプ弁を主復水器近傍に設置し、大口径となる二次側低圧管をできるだけ短縮して、更に適当な寸法のダンピングチャンバを設けて注水するなどの方策をとる必要があろう。

(a)は内部および外部緩熱器による二段減温方式で外部緩熱器での減温幅を少くしたもの(b)は外部緩熱器のみで減温システムの簡素化を計ったものである。(a)および(b)システムで⑩は制御弁各々が高差圧制御弁で発生する管系の騒音を低減する手段の一つとして抵抗の直列配置を挙げているため、これをその代表として多孔板で例示したものである。

また、システム(a)でのダンプ弁設置場所については、点線で示した緩熱器入口側と実線で示した緩熱器出口側の二案が考えられる。内部緩熱器を流れる蒸気の体積流量を小さくし、圧力損失を最少とするには緩熱器出口側にダンプ弁を設けるのがよく、通常負荷時で、内部緩熱蒸気流量が少ないときに、緩熱蒸気が湿り域に膨脹する危険性を少くするために緩熱器入口側にダンプ弁を設けるのがよい。両者の得失はボイラドラムの緩熱管設置スペース、内部緩熱器の許容圧力損失などの要素で左右されるので具体的なプラント構成の中で評価すべきである。

ダンプシステムの信頼性を確保する上で復水器の保護対策が必要となる。例えば予期しない高エンタルビの蒸気がタービン排気ケーシングに吹き当ってケーシングが不均一に熱膨脹するようなことがあってはならない。予測される事態に対して、ダンプ弁の危急遮断で応じるか、警報のみにとどめるかは更に具体的なプラント構成およびその中のダンプシステムを確立した上で詳細を検討すべきであるが、予測される事態を列挙すれば次のようなものがあげられよう。

- (a) 復水器の内圧過上昇
- (b) 減温注水圧力低下または注水弁作動不良
- (c) ダンプ蒸気復水器入口温度の過上昇
- (d) 復水器ホットウェル水位異常上昇

#### 3.5 まとめ

石炭だき船の余剰蒸気ダンプシステムについて、造船各社と構成要素メーカーに対して行ったアンケ

ート調査の集約を中心にして、それに若干の考察を加えたが、石炭だき船の余剰蒸気ダンプシステムは自動燃焼制御装置とほとんど同等の重要な制御装置であるためシステムの過渡応答に対する要求仕様について更に検討を進める必要がある。

また、ダンプシステムは高エンタルピ蒸気の短時間処理であるため、システム中における構成要素の熱応力、熱衝撃および騒音とそれに付随する振動に対して、十分な配慮がなされるべきであることは論をまたない。

### 参 考 文 献

- 1.3.1 日本機械学会編「機械工学便覧」
- 1.3.2. 日本機械学会編「伝熱工学資料」
- 1.3.3 Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc., USA  
"Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association" New York, 1959
- 1.3.4 A.P.Fraas & M.N. Ozisik "Heat Exchanger Design"  
John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965
- 1.3.5 落合安太郎「新版熱交換器」日刊工業新聞社, 昭和41年
- 1.3.6 化学工学協会編「熱交換器」丸善, 昭和46年
- 1.3.7 竹田洋一郎「熱応力」日新出版, 昭和46年
- 1.3.8 U.N. Baden "Design and Layout of the Low-Pressure By-pass System"  
Brown Boveri Rev. 8-78

## 第2編 船内環境保全のための調査研究

### 第1章 振動・騒音防止

#### まえがき

船内における振動・騒音問題は船内環境の問題として取り上げられ、近年ますます重要視される傾向にある。こうした現状をふまえ、ここでは石炭だき船における運炭・灰移送関連機器の振動・騒音が船内環境に及ぼす影響を調査し、また、その予測を試みる。

調査にあたっては、石炭関連機器の各メーカーあるいは各ユーザに対してアンケート調査を実施し基礎データの蒐集を行なうとともに実際に石炭を使用している現場において現地調査をも試みた。こうしたデータを元に、一つの代表的な石炭だき船の機関部プラントを想定し、プラントを構成する機器のうち運炭・灰移送関連の機器から発する振動・騒音の機関室及び居住区に及ぼす影響度を予測した。

#### 1. 調査対象機器

石炭関連の機器として、本文において対象としたのは石炭庫、石炭移送装置、灰処理および灰移送装置とし、主機、ボイラ等の機器は除外した。

#### 2. アンケート調査結果

アンケート調査は、各機器の騒音レベル、連続音か断続音かの種類とその周期あるいは運転モード、また機器および据付部の振動加速度とその主要周波数および振動の種類、さらに機器の重量、寸法、また振動・騒音の防止対策を質問した。アンケート先は、メーカー35社、造船会社6社およびユーザ8社の合計49社で、そのうち何らかの回答があったのは計15社であった。

回答の中では、機器の発する騒音とその種類については回答がなされていたが、振動についてはデータを持っている所が少なかったためあまり多くの回答が得られなかつた。

これらの回答を取りまとめたのが表2・1・1である。

表2・1・1 アンケート調査結果

機器名	騒音 dB (A)											振動 (gal)	防振・防音 対策・備考
	40	50	60	70	80	90	100	110					
石炭払出し				中									
スクリューフィーダ		低											
ドラッグチェンコンベア			→	→									
振動フィーダ			低									5000 ~ 10000	防振支持
ライトコンベア													
エアハンマー/キャノン						高							
サーキュラビンディスチャジャー													
バイブレータ				→	→							100	貯槽側板振動
運炭													
ベルトコンベア			→		↔								
ドラグチェンコンベア			低		↔								
バイブルーホッパ			→										貯槽側板振動
バケットコンベア													
コールクラッシャ						高	高						
振動スクリーン							→						
走行トリフォーパ							↔						
振動コンベア												4,000	
空気圧縮機							↔					470	サイレンサ
石炭移送配管			↔	↔									
デンスペックセル						↔	↔						切換時のエアプロ
灰(真空移送)													
クリンカクラッシャ													
ハンマタイプ							高						
インパクトタイプ													
ロールタイプ			→									24	防振支持
灰移送配管			↔	↔									
空気吸入弁													
ハイドロバクタ													
ナッシュポンプ													
スチームエゼクタ				中									
サイクロン				→									
スイングダンバー													
バキュームブレーカ													瞬時
灰(空気圧送)													
ブロワ							高						
エゼクタ					中								
灰移送配管		低											
サイクロンセパレータ													エアブロー
灰(スラリー)													
高圧海水P													
ジェットバルジョンP													
スラリーP				中			高						

このアンケート調査結果を見ると、問題となるような振動・騒音を発する機器は少ない。

振動・騒音について個別にみてゆくと、比較的騒音の大きなものは、(90 dB(A)を越えるもの)

エア・ハンマ（石炭ブリッジ崩壊用）

バケットコンペア

走行トリッパ

デンスペッセル（切換時のエアブロー音）

空気吸入弁

ナッシュポンプ

バキュームブレーカ

プロワ

サイクロンセパレータ（エアブロー時）

高圧海水ポンプ

等があげられる。なお、騒音で比較的レベルの高いのは、空気の流れに関連したものが多いのは注目に値する。

一方振動については、

バイブレーティングフィーダ

振動式ピンディスチャージャ

振動コンペア

等が問題となるような値を示している。しかし、これらはいずれも振動させることが基本機能となっているものばかりであり、当然といえる。尚、これらは船体全体を揺らす程の起振力ではなく、Local的振動にとどまるものであり、また、これらの機器を船体に取りつける際に防振対策を施す等の処置で簡単に解決できるものと考えられる。

### 3. 陸上石炭だきボイラ実地調査

#### 3.1 D社（石炭だきボイラ）

D社の概略石炭移送・灰処理設備とその振動・騒音レベルを図2・1・1に示す。また代表的な点の騒音のオクターブ分析結果を表2・1・2に示す。

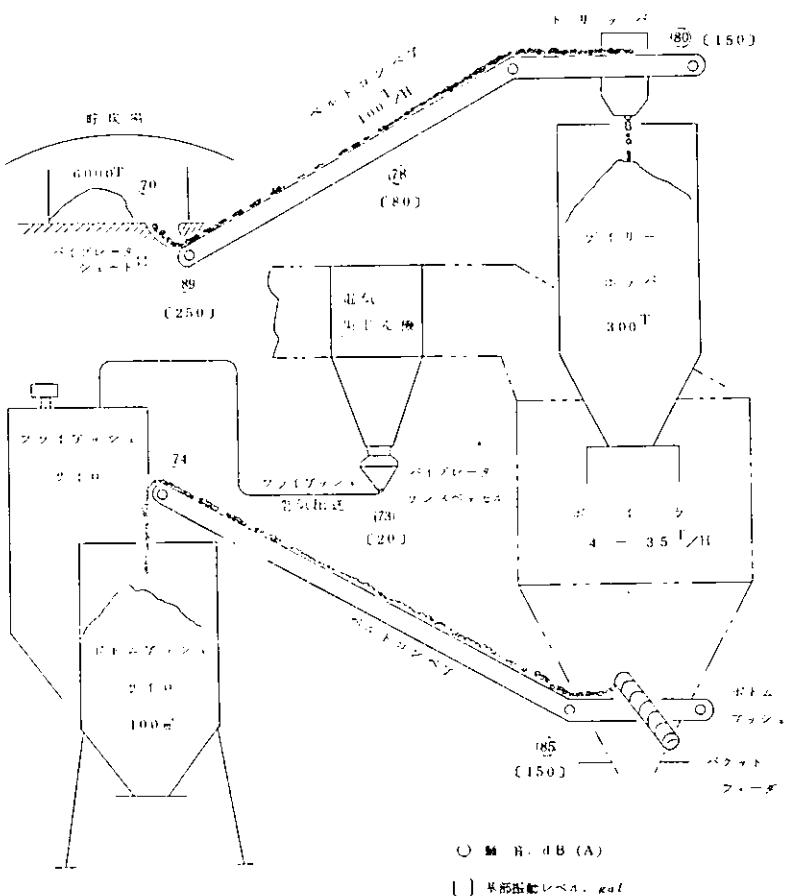


図2・1・1 D社の振動・騒音レベル実態

表2・1・2 D社の騒音のオクターブ分析結果

計測場所	O.A. dB(A)	O.A. dB(C)	O.A. FLAT	オクターブ分析 (dB)								
	315	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K			
貯炭場	70	80	87	75	75	75	75	72	65	60	55	50
バイブレータ付シート	89	102	105	97	104	86	81	84	84	81	68	65
ベルトコンベア(石炭)	78	83	83	76	73	78	76	78	74	70	65	60
トリッパ	80	88	89	75	76	86	84	77	72	70	68	68
ボトムアッシュ取出部	85	94	95	86	90	87	85	83	79	68	65	60
ボトムアッシュサイロ上部	74	81	82	75	70	74	77	77	71	67	65	62
デンスペッセル(灰)	73	80	90	88	78	74	77	70	66	63	58	50

D社の場合石炭は、約6,000Tの貯炭場よりショベルローダにて地下にあるバイブルエタ付シートへ落とし込み、ここより出て来た石炭をベルトコンベアによって、ボイラの上部にあるデイリーホッ

バーまで移送する。また、ボイラより出てきたボトムアッシュはベルトコンベアによってボトムアッシュサイロへ送られる。一方電気集じん機によって集められたフライアッシュは空気圧送方式によりフライアッシュサイロへと送られる方法が採られている。

D社の場合の振動・騒音レベルを見ると、振動・騒音ともに最も激しかったのが、貯炭場下にあるバイブレータ付シートで、振動が250 gal、騒音が89 dB (A) であった。次に激しい振動・騒音が記録されたのはボトムアッシュをコンベアに載せる回転バケットのある周辺で、振動が150 gal、騒音が85 dB (A) を示している。ただこの場合には周囲の他の補機器の影響が入っているためバケット独自の騒音レベルを示したものでない。

比較的騒音の懸念されていた石炭移送用ベルトコンベアについては騒音が78 dB (A) 程度であり予想外に低い値であった。即ち、100T/H の能力 (1 m/sec 程度) といった比較的小型のベルトコンベアについては、騒音はさして問題とならないと言える。ただベルトコンベアの場合可動部が非常に多いため、可動部の油きれや偏摩耗によって、異常騒音の発生する可能性を秘めているため注意は必要のようである。

一方代表的な点の騒音のオクターブ分析結果をみると、比較的人間にとて感覚の鈍い低周波の音のレベルの方が高いという結果を示している。

また振動については周波数分析は行なえなかつたが、ピークを示す周波数のみを測定した限りにおいては、200 ～ 500 Hz 程度のものが多く、ほとんどが、音響域振動であったことを示していた。したがって振動については、振動というよりも固体伝播音の問題として捕えるべきものと考える。

### 3.2 H社(石炭だき温水ボイラ)

H社の概略石炭移送・灰処理設備とその振動・騒音レベルを図 2.1.2 に示し、また代表的な点の騒音のオクターブ分析結果を表 2.1.3 に示す。

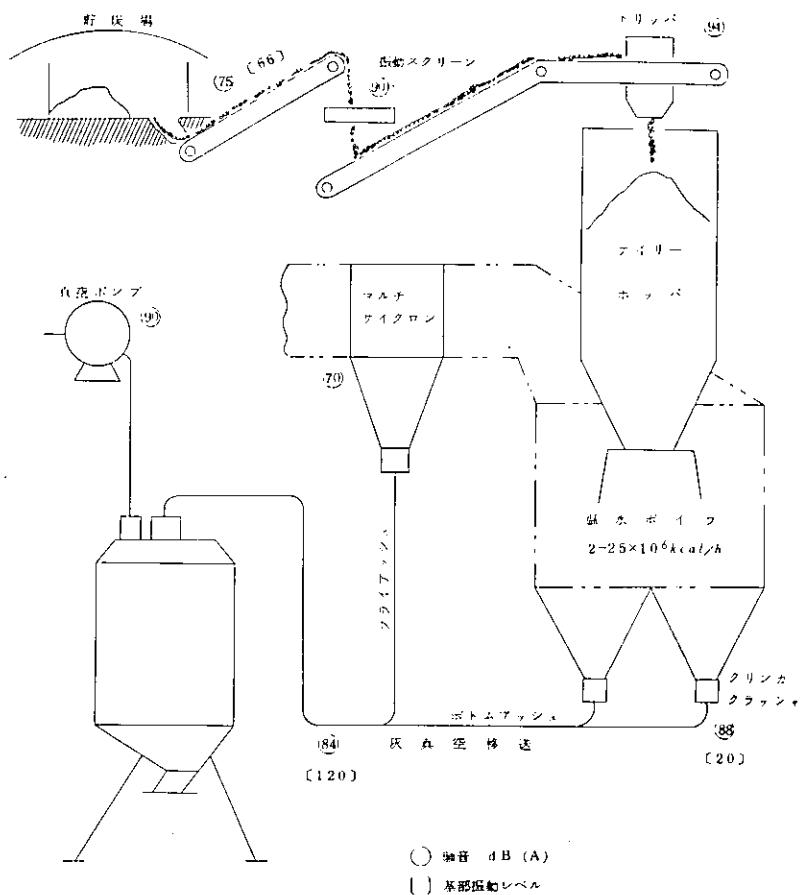


図2・1・2 H社の振動・騒音レベル実態

表2・1・3 H社の騒音のオクターブ分析結果

計測場所	O.A. dB(A)	O.A. dB(C)	O.A. FLAT	オクターブ分析結果(dB)								
				315	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
ベルトコンベア	75	88	91	75	75	75	76	73	71	62	55	50
ボイラ前	82	86	87	79	76	76	80	80	79	72	66	60
クリンカクリッシャ	88	91	93	85	84	79	84	85	88	77	72	61
灰移送管	84	86	90	83	72	68	66	67	75	75	74	70

H社の場合も石炭は約1.200Tと2.000Tの貯炭場よりショベルローダとベルトコンベアによってディリーホッパーに運ばれる。また灰については、ボトム、フライアッシュ共に真空移送によってアッシュサイロへと運ばれるシステムである。

振動・騒音レベルは前述のD社と大差ないが、H社の場合、石炭移送用ベルトコンベアの途中にある振動スクリーン及び最終端にある走行トリッパの騒音レベルが高く、それぞれ90dB(A), 94dB(A)を示している。この程度の騒音があるとその機器近傍においては問題となるレベルであるが、これらが点音源的な音の拡散をすれば船内騒音を支配するほどの値ではない。

また、騒音のオクターブ分析結果は、前述のD社と同様比較的低周波の音のレベルが高い。

#### 4. 船内搭載時の機関室、居住区に与える騒音影響予測

実船に各機器を搭載した場合の船内における振動・騒音予想は多くの要素が複雑に絡み、正確に行なうことは非常に難しい。ここではある一つの石炭だき船を想定し、実船における騒音予測を試みる。尚振動については先に述べたように問題となるものではなく、むしろ音響域振動として扱うべきものでここでは省略した。

対象とした機器は先に述べた運炭・灰処理移送関連とし、主機タービン、ボイラおよびその他の補機等については除外している。

表2.1.4に、ここで想定した石炭だき船の主要目を示す。

表2.1.4 主要目表

項目	要目
船種	13万載貨重量トンばら積貨物船
長さ	24.8m
幅	4.4m
深さ	2.4.8m
喫水	1.6.8m
主機	蒸気タービン
出力	20.000PS × 80rpm
ボイラ	2-3.5T/H (石炭だき)
運炭ライン	4-1.5T/H (空気圧送)
灰移送ライン	
ボトムアッシュ	2-2T/H (真空移送)
フライアッシュ	2-1T/H (真空移送)

船内に各機器を搭載した場合、騒音源が点音源の時の騒音レベルSPLは、

$$SPL = PWL + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \dots (2.1.1)$$

で表わされる。ここで  $r$  : 音源より計測点までの距離 (m)

PWL : 機器の発する音のパワーレベル (dB)

Q : 指向係数

R : 室定数 ( $m^2$ )

である。従って、船内のSPLを知るには、各機器のPWLを知る必要があるが、ここでは、アンケートおよび現地調査より得られた結果から推定した。推定にあたっては、アンケート及び現地調査での条件を  $r = 1m$ ,  $Q = 2$ ,  $R = \infty$  であったと仮定して PWL を求めた。

また、配管のように、音源が線音源とみなされるものについては、室定数を無視して、かつ音源の長さが無限大であつたと仮定した式

$$SPL = PWL_0 + 10 \log \left( \frac{Q}{2\pi r} \right) \quad \dots \dots (2.1.2)$$

から、単位長さ (1 m)あたりのパワーレベル  $PWL$ 。を求めた。

以上的方法で推定した  $PWL$  及び  $PWL_0$ を基に各機器の近傍1 mの地点における騒音レベルを予測し、想定したプラントの構成図とともに図示したのが図 2.1.3 である。

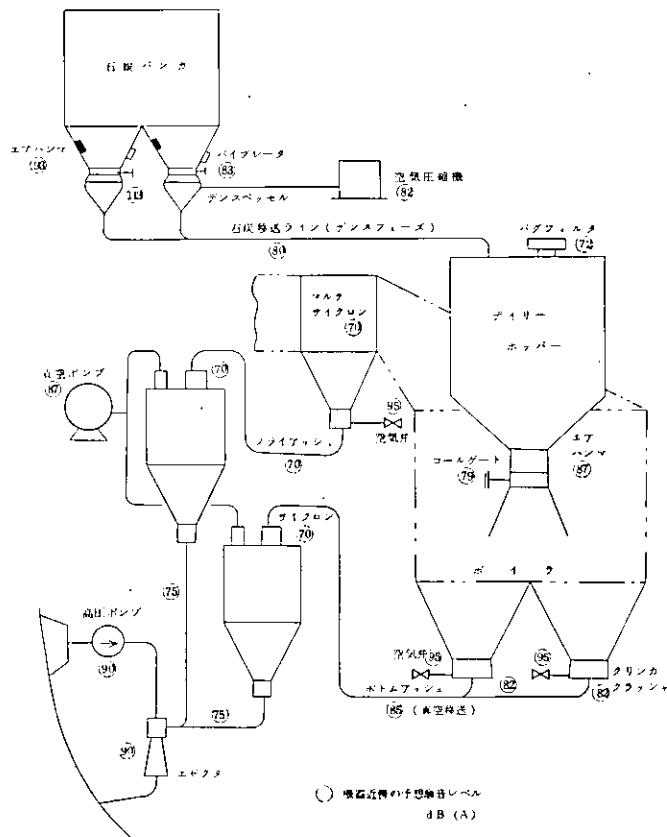


図 2.1.3 石炭だき船の運炭・灰処理システムの一例と  
機器近傍の予想騒音レベル

尚船内における  $Q$  は、機関室の床、壁付近の機器は 2 を、稜線付近のものは 4 を、中央付近のものには 1 を与えた。また機器近傍の音ということで室内への散乱音の影響は無視した。

想定したモデルの構成機器のうち、その近傍において騒音レベルが特に高いのは、デンスペッセル(ただし瞬時)の 113 dB (A) と空気吸入弁の 95 dB (A) である。従ってこれらの機器については、何らかの騒音対策が必要となろう。

一方、これらの機器を船内に図 2.1.4 のように配置した場合の機関室内的代表的位置(機関制御室の前)における騒音レベルを予測すると 81.9 dB (A) と予測される。(デンスペッセルを考慮すると瞬時ではあるが 88.1 dB (A) に達する。) この予測にあたっては、点音源については式(2.1.1)を使用し、有限長さの線音源については

$$SPL = PWL_0 + 10 \log \left\{ \frac{Q}{4\pi r} \left( \tan^{-1} \frac{x_2}{r} - \tan^{-1} \frac{x_1}{r} \right) + \frac{4L}{R} \right\} \quad \dots \dots (2.1.3)$$

を使用した。ここで

- $r$  : 線音源（あるいはその延長線上）へおろした垂線の足までの距離 (m)  
 $x_1$  : 垂線の足から線音源の端までの距離 (m)  
 $x_2$  : 同上 (m)  
 $L$  : 線音源の長さ,  $x_1 - x_2$  (m)

である。

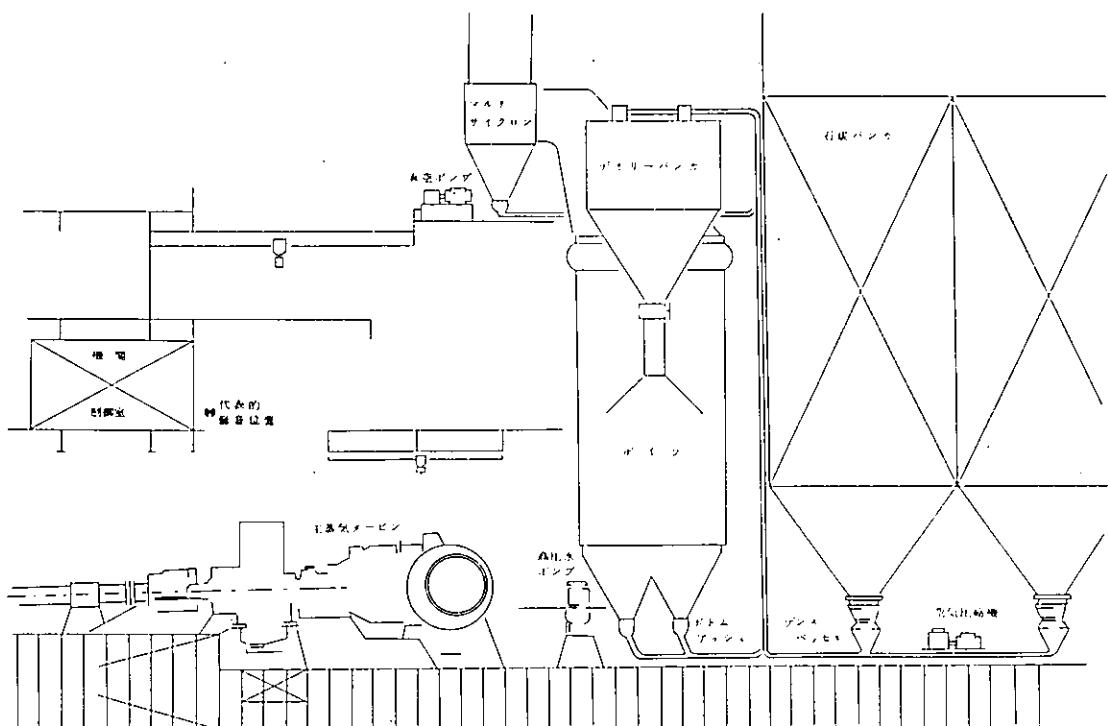


図 2・1・4 石炭関連機器予想概略配置図

また室定数  $R$  は全周波数一定で  $13.000 \text{ m}^2$  (SR 156 報告書より推定) を仮定した。表 2.1.5 には計算に使用した各値を示す。

表2・1・5 騒音推定データ

機器名	測定SPL	推定PWL	船内推定SPL	Q	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	L	r	代表点の騒音		備考
									SPL/Sel	SPL	
点音源	バンカ下エアハンマー	90	98	93	4			26	66.9	69.9	
	バンカ下バイブレータ	80	88	83	4			26	56.9	59.9	
	デンスペッセル	110	118	113	4			26	86.9	86.9	瞬時
	空気圧縮機	85	93	82	1			28	59.1	59.1	
	デイリイホッパエアハンマー	90	98	87	1			17	65.7	68.7	
	バグフィルタ	75	83	72	1			18	50.4	53.4	
	コールゲート	82	90	79	1			16	57.9	60.9	
	クリンカクラッシャ	85	93	82	1			18	60.4	63.4	
	ボトムアッシュ空気弁	95	103	95	2			18	72.0	75.0	
	ボトムアッシュサイクロン	70	78	70	2			20	46.5	49.5	
線音源	真空ポンプ	90	98	87	1			12	67.3	67.3	
	フライアッシュ空気弁	95	103	95	2			14	73.5	76.5	
	マルチサイクロン	70	78	70	2			15	48.1	51.1	
	フライアッシュサイクロン	70	78	70	2			20	46.5	49.5	
	エゼクタ	90	98	90	2			24	65.7	65.7	
	高圧水ポンプ	90	98	90	2			17	67.3	67.3	
	石炭移送ライン	80	85	80	2	20	24	4	58.4	61.4	
	"	80	85	80	2	-10	10	20	65.0	68.0	
灰船外吐出ライン	"	80	85	80	2	15	20	5	60.0	63.0	
	ボトムアッシュ移送ライン	85	90	85	2	15	20	5	65.1	68.1	
	"	85	90	85	2	-10	10	20	70.0	73.0	
	"	85	90	85	2	13	20	7	65.8	68.8	
	フライアッシュ移送ライン	70	75	70	2	10	20	10	53.8	56.8	
	"	70	75	70	2	7	11	4	47.9	50.9	
	"	70	75	70	2	13	20	7	50.8	53.8	
	灰船外吐出ライン	75	80	75	2	15	20	5	54.5	54.5	
合計音									81.9 通常		
									88.1 瞬時		

一方、機関制御室の防音効果はSR156報告書によれば、-21.5 dB(A)とされているが、この値をそのまま仮定すると、機関制御室の騒音レベルは、60.4 dB(A)（瞬時66.6 dB(A)）と予想される。一般的なタービン船の機関制御室が70 dB(A)程度であることを考慮すれば運炭・灰移送関連機器の発する騒音は他の騒音にうずもれてしまう程の小さなものであるといえる。

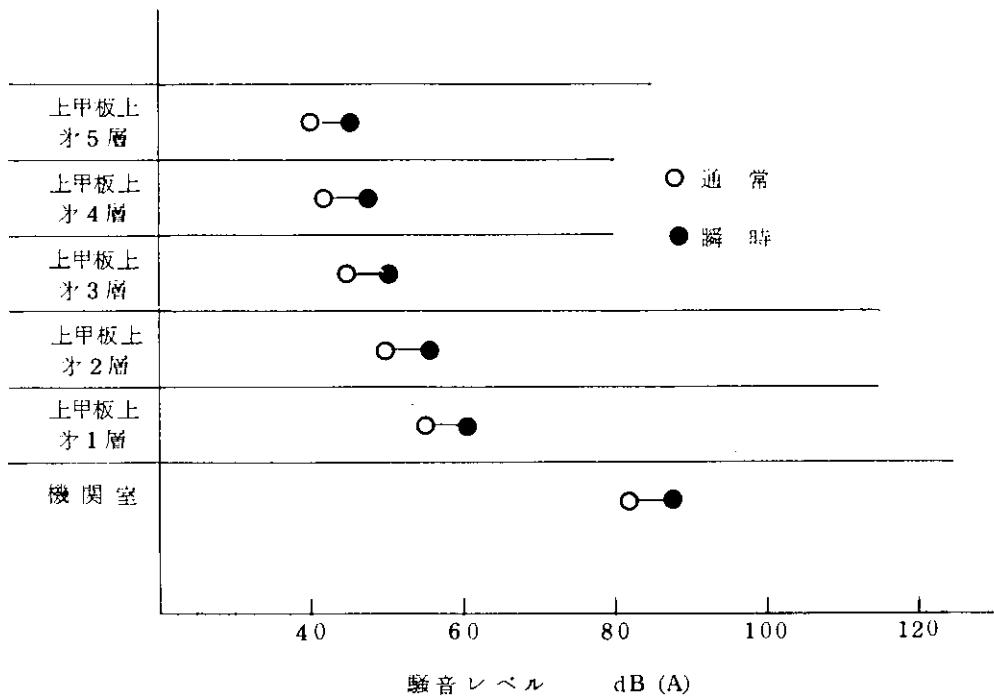


図2.1.5 居住区での予想騒音レベル

またこれらの機器が居住区に対してどのような影響を与えるかについては非常に難しいが、SR156報告書に記載の実績から推定すると、ほぼ図2.1.5のような傾向になることが予想される。55 dB(A)を居住区の目安とすると、上甲板上才1層目と才2層目において瞬時越える可能性があるが、その他については問題となるような値にはならない。

## まとめ

石炭だき船における運炭・灰移送関連の機器の振動・騒音について検討し、その船内に与える影響について調査した結果、次のようなことがわかった。

- (1) 振動は高周波域（音響域振動）に多少あるがその値は小さく、ローカルな振動にとどまる。  
ただし、振動式の各種フィーダ等振動自体が基本機能となっているものについてはその支持に防振対策を行なう必要がある。
- (2) 騒音については、空気の流れによって発するものが比較的レベルが高く、消音器等の採用が望まれる。  
しかし、全般的には騒音レベルは低く、想定したモデルでは機関制御室で60 dB(A)から67 dB(A)居住区では55 dB(A)以下と予想され、問題とはならない。

## 引用文献

- 1) 日本音響材料協会編“騒音対策ハンドブック”技報堂 p.253 ~ 266
- 2) 日本造船研究協会 “第156研究部会船内騒音に関する調査研究報告書” 昭和52年3月、昭和53年3月

## 第2章 炭じん・石炭灰の拡散防止

### まえがき

本調査研究では当面採用が予想されるストーカだきボイラを搭載した石炭だき船の石炭及び石炭灰の船内移送系統に着目し、そこから発生する可能性のある炭じん・石炭灰について、船内環境保全の観点から、その発生状況について調査し、防止対策を検討することを目的とした。

石炭の船内移送系統として考慮した範囲はメインパンカ出口からデイリーサービスパンカを経て、ボイラ付き石炭散布器前までとし、移送方式としてはメカニカル方式及びデンスフェーズ空気輸送方式を考えた。石炭灰の船内移送系統として考慮した範囲はボイラ下クリンカホッパー及び集じん器ホッパー下部からアッシュタンクまたは舷外吐捨までとし、移送方式としては真空移送、空気圧送及びスラリー方式を考えた。調査にあたっては、造船会社、関連機器メーカ及び陸上用ストーカだき石炭ボイラユーザにアンケート調査を実施し、また、若干の上記ユーザを訪問して、実施調査も実施した。

### 1. アンケート調査

#### 1.1 アンケート調査要領

##### 1.1.1 アンケート調査にあたっての想定石炭移送、灰処理及び関連システム及び条件

アンケート調査にあたっては、回答者へのガイダンスとして、本テーマにて想定しているシステム及びその範囲を次の如く与えた。

###### (1) 石炭移送システム

メカニカル方式(ベルト、バケット、チェインコンベア等の組合せ)またはデンスフェーズ空気輸送方式

範囲はメインパンカ下(メインパンカ本体は含まず)からボイラ前のデイリーサービスパンカを経て、ボイラ付きの石炭散布器入口(散布器本体は含まず)までとする。

移送システムの数量: 合計 2 SETS(うち1SETは予備) × (50~100)m

移送量 : メカニカル方式 30T/H × 2 SETS

空気輸送方式 15T/H × 2 SETS

デイリーサービスパンカ容量 : メカニカル方式 120T

空気輸送方式 60T

###### (2) 灰処理システム

ボトムアッシュ } : スラリー方式または真空移送方式  
アッシュ舷外吐捨 }

フライアッシュ : 空気圧送方式または真空移送方式

範囲はボイラ下クリンカホッパー及び集じん器ホッパー下部からアッシュタンクまたは舷外吐捨までとする。

灰分含有量/灰発生量 : 約20% WT / 約2T/H

ボトムアッシュ発生量(70%) : 約 1.4 T/H

フライアッシュ (30%) : 約 0.6 T/H

ボトムアッシュシステム処理容量 : 1.75 T/H

フライアッシュシステム : 0.75 T/H

###### (3) 対象石炭種 : サイズ35mm以下の中塊炭

###### (4) 対象石炭だき推進プラント

主機出力 : 20.000 PS クラス蒸気タービン 1基

主ボイラ : 敷布ストーカだきボイラ

総蒸発量 70～80T/H

石炭消費量 約10T/H

- (5) 尚、本調査研究では船内に漏洩する炭じん、石炭灰のみを対象とし、船外に放出されるものは対象外とする。

### 1.1.2 アンケート調査項目

後述1.2項に記載する石炭移送、灰処理関連の各種機器につき、1)その形式、2)炭じん、石炭灰漏洩の可能性の有無、3)漏洩の状況、4)漏洩の箇所、5)漏洩予想量、6)漏洩防止対策及びその効果等の項目につきアンケート調査を実施した。

## 1.2 アンケート調査結果

アンケートは53社(造船会社7社、ボイラーユーザ6社、メーカ40社)に依頼し、22社より回答を得た。

以下に回答結果を要約して示す。

### 1.2.1 石炭移送システム

#### (1) メカニカル方式

機 器	回 答	備 考
(a)コールゲート (メインパンカ下)	<ul style="list-style-type: none"><li>○スライド・ゲート、ロータリバルブ、ロッドゲート等の形式あり。</li><li>○スライド・ゲート使用のユーザからは漏洩なしとの回答あり。</li><li>○スライドプレートのシール部が摩耗した時には、ゲート作動時、約0.5kg/サイクル程度の漏洩が考えられる。その他シール交換時に少量(100g程度)の、また解放点検時にはかなりの量の炭じん漏洩が考えられる。</li><li>○ロータリバルブについてはユーザからのデータはないが、スライドゲートと同様のことが言える。</li><li>○ロッドゲートについてはロッドホールからの漏洩あり、有効な対策なし。</li></ul>	<p>(ゲートを密閉構造とし適正なメンテナンスが行われているためと思われる。)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>○部品摩耗時</li><li>○部品交換時</li><li>○解放点検時</li></ul>
(b)石炭払い出し装置 (メインパンカ下)	<ul style="list-style-type: none"><li>○チェインコンベア、スクリュコンベア、ラバーベルトフィーダ、バイブレーティングフィードシャトル等の形式あり。</li><li>○ダストタイトケーシング付きとすれば正常運転時の炭じん漏洩はなし。</li><li>○但し点検、メンテナンス時に炭じん漏洩の可能性あり。</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ダストタイトケーシング</li><li>○解放点検時</li></ul>

機 器	回 答	備 考
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○パイプレーティングフィーダではフレキシブルジョイントの破損時又は交換時あるいは、振動による接合部のゆるみが生じると炭じん漏洩の可能性あり。</li>   <li>○内部の移送速度を小さくすることにより発じんを极力抑えること。</li> <li>○排出側から集じんしケーシング内部をやゝ負圧にして炭じん漏洩を防止することも考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○フレキシブルジョイントの破損又は交換時</li> <li>○振動による接合部のゆるみ</li> <li>○移送速度と発じん量。</li> <li>○排気集じん</li> </ul>
(c)コンベア	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ベルトコンベア、チェインコンベアの形式あり。</li> <li>○機器の性格上、内部発じんは避けがたいが、ダストタイトケーシング付きとすれば正常運転時の炭じん漏洩は防止できる。</li> <li>○但し、点検又はメンテナンス時には炭じん漏洩の可能性あり。</li> <li>○内部発じんの多い箇所としてはベルトコンベアにおけるベルトクリーナ部、又、コンベアの乗継ぎ部が考えられる。</li> <li>○ケーシング内をバグフィルタ、ペントファンにて集じんし外部への炭じん漏洩を防止することが考えられる。</li> <li>○陸上のユーザでは貯炭場に散水して移送中の発じんを抑えている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ダストタイトケーシング</li> <li>○解放・点検時</li> <li>○ベルトクリーナ、乗継部での発じん</li> <li>○排気集じん</li> <li>○散水による発じん抑制</li> </ul>
(d)コールクラッシャ	<ul style="list-style-type: none"> <li>○選炭を使用する場合には、通常コールクラッシャは装備しないが、形式としてはハンマタイプ、インパクトタイプがある。</li> <li>○正常運転中は炭じん漏洩はないと考えられるが、ハウジング接合部あるいは軸シール摩耗時には炭じん漏洩の可能性あり。また摩耗部品交換のため機器を分解する時には5～10kg程度の炭じん漏洩はあろう。</li> <li>○炭じん漏洩の防止にはハウジング、軸シールの適正メンテナンスが必要であるが、排出側の機器から集じんし、内部をやゝ負圧にして炭じん漏洩を防止することが考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○シール部の摩耗・消耗</li> <li>○解放・点検時</li> <li>○排気集じん</li> </ul>
(e)コールエレベータ	<ul style="list-style-type: none"> <li>○チェインコンベア、バケットコンベアの形式あり。</li> <li>○排出時の投げ出し、こぼれ、コンベアへの付着炭に</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ダストタイトケーシング</li> </ul>

機 器	回 答	備 考
	より内部発じんは避けられないでの、供給口、排出口、点検口から炭じん漏洩の可能性があるが、ダストタイトケーシング付きとし、頂部より集じんすれば外部への漏洩は防止できる。	○排気集じん
(f)ディリーサービスパンカ	<ul style="list-style-type: none"> <li>○落し込み口近傍のパンカ上部全面に内部発じんあり（最大約 <math>30 \text{ g/m}^3</math> 程度）。上部の気体空間をできるだけ小さくするとともに、供給口、排出口、点検口等のシール部を完全にし、パンカ頂部から、ペントファン、バグフィルタで排気集じんすれば（排気濃度は約 <math>20 \text{ mg/m}^3</math> 以下）正常運転時の炭じん漏洩は防げる。</li> <li>○付着品、シール部の損耗時、メンテナンス時には炭じん漏洩の可能性あり。</li> <li>○内部発じん抑制のために水噴霧することも考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○气体空間を小さく。</li> <li>○排気集じん</li> <li>○付着品・シール部の損耗</li> <li>○保守時</li> <li>○水噴霧</li> </ul>
(g)石炭計量器	<ul style="list-style-type: none"> <li>○間歇式、及び連続式の型式あり。</li> <li>○密閉構造とすれば正常運転時の炭じん漏洩は防止できる。</li> <li>○メンテナンス時には炭じん漏洩の可能性あり。</li> <li>○器内を吸引通風することも考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ダストタイトケーシング</li> <li>○解放点検時</li> <li>○排気集じん</li> </ul>
(h)コールショート	<ul style="list-style-type: none"> <li>○角型あるいは円錐型の鋼板密接構造であり、フランジ面のシールを完全にしておけば正常運転時の炭じん漏洩はないが、摩耗、腐食等により、ショートに孔があき、炭じんが漏洩することはありうる。</li> <li>○ショートの定期点検が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ショートの摩耗腐食による穿孔。</li> </ul>
(i)コンベア／エレベータの接続部	<ul style="list-style-type: none"> <li>○自由落下個所では内部発じん（約 <math>20 \text{ g/m}^3</math> 程度）は避けないのでカバーにてマスキングし、外部への炭じん漏洩を防ぐことが必要である。</li> <li>○内部発じん自体を極力抑えるためには自由落下距離を減らすのが有効である。</li> <li>○コンベア／エレベータの接続部へのペントファンの装備の必要性については要否の回答が半々であり、コンベア／エレベータ系統全体に対する排気通風計画とのかねあいから、接続部へのペントファン装備の要否が決められるものと考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ダストタイトケーシング</li> <li>○自由落下距離と発じん</li> <li>○接続部へのペントファン装備の要否</li> </ul>

(2) デンスフェイズ空気輸送方式

機 器	回 答	備 考
(a)コールゲート (メインバンカ下)	○ 1.2.1(1) メカニカル方式の項参照	
(b)石炭払い出し装置 (メインバンカ下)		
(c)コールクラッシャ		
(d)デンスベッセル	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 部品の摩耗、ガスケット破損等の場合を除いて、正常運転時には炭じん漏洩の可能性はない。</li> <li>○ メンテナンス時、デンスベッセルを取り外す時には炭じん漏洩の可能性あり。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 部品摩耗</li> <li>○ ガスケット破損</li> <li>○ 解放・点検時</li> </ul>
(e)石炭移送配管	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 正常運転時には炭じん漏洩は考えられないが、但し、フランジボルトの締付け不良時、あるいは管（特に曲がり部）の摩耗により配管に孔があいた時には炭じん漏洩の可能性あり。</li> <li>○ 日常の予防的保守及び超音波による管壁厚さのチェックが必要。</li> <li>○ 管補修のため配管を取り外す時には炭じん漏洩の可能性あり。 尚、溶接取付修理の場合には爆発防止に要注意。</li> <li>○ デンスフェイズ方式は本質的に内部発じんは大であるので、防爆の意味から、キャリヤガスにイナートガスを使用するとの回答あり。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 配管曲がり部摩耗</li> <li>○ 超音波管内厚チェック</li> <li>○ 管補修等</li> </ul>
(f)フィルタ（ディリーサービスバンカ頂部に設置）	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ バグフィルタが使用される。</li> <li>○ 内部発じんは大（最大 30 g/m<sup>3</sup>程度）であるが、フィルタのシール部を完全にすれば機関室内への炭じん漏洩は防止できる。</li> <li>○ フィルタメンテナンス時には炭じん漏洩あり。</li> <li>○ フィルタの移送速度はできるだけ下げ、静電気を帯びにくいフィルタ材を使用する。</li> <li>○ バグフィルタ破損時には、デンスペイヤユニットの 1 サイクル当たり、50 g 程度の発じんが考えられる。フィルタバッグの適正なメンテナンスが必要となるが、フィルタからの排気ダクトは船外に導設する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 保守時</li> <li>○ 排気ダクト船外導設</li> </ul>
(g)ディリーサービスバンカ	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1.2.1 (1) メカニカル方式 (f) 項参照</li> <li>○ 正常運転時には炭じん漏洩の可能性はないが、ターミナルボックス、ダンプバルブ、スイッチバルブ等に</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ ターミナルボックス等のエアシール</li> </ul>

てエアシールが破損した時には炭じん漏洩の可能性あり。

### 1.2.2 灰処理システム

#### (1) ドライ真空方式(ボトムアッシュ及びフライアッシュ)

機 器	回 答	備 考								
(a)クリンカクラッシャ	<ul style="list-style-type: none"> <li>○スパイラルタイプ、ロールタイプ(歯付、シングル、ダブル)、ハンマタイプ、インパクトタイプ等の形式あり。</li> <li>○密閉式とすれば正常運転時の灰漏洩はないが、点検分解時には灰漏洩あり。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ダストタイトケーシング</li> <li>○解放点検時</li> </ul>								
(b)灰 移 送 配 管	<ul style="list-style-type: none"> <li>○正常運転中であれば灰漏洩はない。</li> <li>○但し、移送管が摩耗により破孔した時には、破孔部より灰漏洩あり。特に曲がり部の摩耗が激しく、この部分の材質を改良することにより、破孔までの時間をできるだけ長くしている(ユーザ)</li> <li>○配管メンテナンス時には灰漏洩あり。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○配管曲がり部の摩耗穿孔</li> <li>○管補修時</li> </ul>								
(c)サイクロンセパレータ	<ul style="list-style-type: none"> <li>○シングル又はマルチサイクロンを使用する。</li> <li>○内部発じんは特にフライアッシュの場合激しいが、シールを完全にし、外部への灰漏洩を防止する。</li> <li>○メンテナンス時には灰漏洩あり。</li> <li>○ケーシングの内厚選定にあたっては、定期検査間で破損を生じないよう考慮する。</li> <li>○セパレート効率は、灰性状によるが、フライアッシュで約80%，ボトムアッシュで約95%程度、又形式により、単式で約85%，複式で約92%程度であろう。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○解放点検時</li> <li>○ケーシング肉厚</li> </ul>								
(d)バグフィルタ	<ul style="list-style-type: none"> <li>○サイクロンセパレータで大部分の灰じんが捕捉されるので、バグフィルタ内部での灰じんは比較的少なく、(<math>\max 10 \text{ g}/\text{m}^3</math>程度)外部への灰漏洩はない。排気濃度は放出許容限度によるが、<math>0.01 \sim 0.02 \text{ g}/\text{m}^3</math>程度であろう。</li> <li>○フィルタ効率は99~99.9%程度であり、1例として</li> <table style="margin-left: 100px; border-collapse: collapse;"> <tr> <th style="text-align: center;">粒 径</th> <th style="text-align: center;">捕 捉 効 果</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><math>2 \mu</math></td> <td style="text-align: center;">4 % by weight</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><math>3 \mu</math></td> <td style="text-align: center;">16 %</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><math>5 \mu</math></td> <td style="text-align: center;">60 %</td> </tr> </table> </ul>	粒 径	捕 捉 効 果	$2 \mu$	4 % by weight	$3 \mu$	16 %	$5 \mu$	60 %	○保守時
粒 径	捕 捉 効 果									
$2 \mu$	4 % by weight									
$3 \mu$	16 %									
$5 \mu$	60 %									

	7 $\mu$ 14 $\mu$	83 % 100 %	" "
(e) 真空発生装置	○ナッシュポンプ、ハイドロバクター等が使われるが灰漏洩の可能性なし。		
(f) アッシュサイロ	○落し込み口付近またはサイロ内部で灰じん発生があるが、(約10 g/m <sup>3</sup> 程度)エアベントラインにバグフィルタをつけ、排気を船外に導設することで機関室内への灰漏洩はない。	○排気ダクト船外導設	

(2) スラリー輸送方式 (ボトムアッシュ移送及びアッシュ舷外吐捨)

機 器	回 答	備 考
(a) クリンカクラッシャ	1.2.2. (1) ドライ真空方式 (a)の項参照	
(b) スラリーポンプ	管継手部等より若干の灰漏洩はありうるもの、一般的	○管継手締付不良
(c) スラリータンク	には灰漏洩はほとんどないものと考えられる。	
(d) ジエットポンプ		

(3) 空気圧送式 (フライアッシュ)

機 器	回 答	備 考
(a) サイクロンセパレータ	1.2.2. (1) ドライ真空式 (c)(d)(f)の項参照	
(b) バグフィルタ		
(c) アッシュサイロ		
(d) エジェクタ	灰漏洩なし	
(e) 灰移送配管	管、特に曲がり部が摩耗した時に灰漏洩あり。予防的保守及び超音波による管の肉厚チェックが必要。	○管曲がり部の摩耗による穿孔 ○超音波による管肉厚チェック

### 1.2.3 ボイラ室

ボイラ室を独立の区画として装備することの要、否につきアンケートした所、造船会社より

- (1) 石炭移送及び灰処理系統が充分にダストタイトにできれば、ボイラ室として特別な仕切りを考える要なし。
  - (2) 石炭移送及び灰処理装置のオーバーホール時、機関室への炭じん、灰じんの拡散に対して、船主が対策を要求する場合につける。
- との回答があった。

## 2. 実地調査

炭じん・石炭灰の拡散防止というテーマの性格上、アンケート調査のみでは不充分と考えられたので、限られた数ではあるが、実際の陸上石炭だきボイラプラント等を実地調査した。

以下に本テーマに関連する事項を報告する。

### 2.1 K 社

#### 2.1.1 概要

K社にて調査したのは石炭だきのプラントに使用される可能性のあるデンスフェイズ空気輸送方式石炭移送装置の実験装置である。

実験装置はパンカ兼ディリーホッパ→バイブレータ付ショート→ゲートバルブ(2ヶ)及びフレキシブルジョイント→デンスペッセル→移送配管→ターミナルボックス→パンカ兼ディリーホッパの閉ループで構成されており、パンカ頂部にはバグフィルタが装備されている。

またパンカ下部とショートはゴムパッキンで接続されており、パンカには対爆用ラブチャーディスクが装備されている。

見学時実験に使用されていた石炭の粒径は20mm以下であり、これを3atgの圧縮空気により移送する。管内流速は約6.7m/secであった。移送配管は100φ、水平配管40m、垂直配管15mであった。

#### 2.1.2 所見

- (1) 本実験装置に関する限り、炭じん漏洩はほとんどなく、わずかにバグフィルタまわりに非常にうすく横っていた程度である。船舶に搭載される場合にはバグフィルタ排気は船外にダクトで導びかれるので、機関室環境からみるとかぎり、正常運転状態では炭じん漏洩の問題はないと言える。
- (2) 但し、フレキシブルジョイント等、破損時には炭じん漏洩の可能性を持っているものがある。又、ゲートバルブのグランドパッキンは1年に1回程度の交換が必要と考えられる。
- (3) 管の摩耗による破孔についてはデンスフェイズ方式の本実験装置については見学時点ではデータ未採取とのことであったが4~5年はもつであろうとのK社の見解であった。

参考までに、K社において以前リーンフェイズ空気輸送方式石炭移送装置の実験を試みた時には配管曲がり部が約1年で破孔した。リーンフェイズの管内流速は約1.6~1.7m/secであった。

- (4) 炭じん漏洩とは直接関係はないが、K社の計測によれば、ディリーホッパ上部での炭じん濃度は最大約30g/m<sup>3</sup>に達した。これは点火源さえあれば、充分爆発のおこるレベルであるが、移送時の帯電エネルギーは着火エネルギーの1/10程度でありその心配はないと考えられる由。但し、石炭に金属片等が混入しており、ディリーホッパ内で激しく衝突した場合には爆発の可能性がある。
- (5) バグフィルタは1m<sup>3</sup>/minの通気量に対し2m<sup>2</sup>程度と、通常の2倍の開口面積を有し、帯電レベル(静電気発生レベル)を1/5程度に下げている。尚フィルタ効率は99.9%であるが、本フィルタは1年に1回程度洗浄を要し、3~4回の洗浄まで使用可能とのことであった。

### 2.2 D 社

#### 2.2.1 概要

D社ではストーカだき石炭ボイラ4基×3.5T<sub>H</sub>(昭和36~38年製)を有し、発電等に利用している。石炭の粒度は3~25mm程度であり、消費量は約100T<sub>D</sub>ボイラ程度である。

石炭は貯炭場から格子、バイブレータ経由ベルトコンベアにのせられディリーホッパに移送され

木ボイラにはクリンカクラッシャは装備されておらず、ボトムアッシュは水封の上、バケットタイ

プのコンベアでベルトコンベアに移され、灰貯蔵タンクに運ばれる。

フライアッシュは電気集じん機下部に設けられたデンスペッセルを経て7 atm空気によりフライアッシュ貯蔵タンクへ圧送される。

### 2.2.2 所 見

- (1) 全体的に見て炭じん、灰じんともほとんど見受けられないが、石炭移送用のベルトコンベアは内に入1人が入れる程度の木製小屋の内に入れられており、この内は1週間に1回位の割合で掃いて炭じんを集める由。
- (2) デイリーホッパは上部はコンクリート製でありこの20年間補修はなしであるが、下部のコニカル部はSS材でできており10年1回程度補修を要する由。
- (3) 昭和55年12月まではフライアッシュ移送はエジェクタ利用の真空移送を行っていたが、この時は管の摩耗が激しく毎日のように補修を行なっていたとのことであるが、上記の如く現状の空気圧送に替えてからは管の摩耗はほとんどなくなったとのことである。
- (4) 大気放出時煙内の塵の量は約 $0.037\text{ g}/\text{m}^3$ 以下の由。

## 2.3 H 社

### 2.3.1 概 要

H社では石炭だき温水ボイラ2基×( $25 \times 10^6$ ) kcal/Hを有し、地域暖房に使用している。使用炭の粒径は3~25mmであり、石炭散布器によるストーカだきを行なっている。

石炭は、貯炭場から給炭バイブレータ、ベルトコンベアによりストーカだきされる。

ボトムアッシュはクリンカクラッシャにより粉砕されたのち、またフライアッシュはフライアッシュホッパから直接に、真空ポンプによる真空移送方式によりアッシュサイロに集められる。

### 2.3.2 所 見

- (1) 石炭移送ベルトコンベアの能力は $100\text{ T}/\text{H}$ である。ベルトコンベアのまわりには炭じん発生があるが、その程度は目視で空気中の塵がわかるという程ではなく、周囲の床に手を触ると塵でわずかに汚れる程度である。コンベアには匂いが設けられているが、所々に匂いのない箇所があり、ここから多少炭じんが漏洩してくるものと思われる。  
その他の機器あるいは装置からの炭じん発生及びその周囲の汚れはほとんどなかった。
- (2) デイリーバンカは腐食により約2mm/10年の板厚減を生じるため下塗りのあとポリウレタン塗装を実施してある由。
- (3) 石炭散布器は摩耗はげしく寿命は約1年とのことであった。
- (4) 灰移送は前述の如くドライ真空式であるが、管口径は $125\text{ A}$ 及び $150\text{ A}$ であり長さ $120\text{ m}$ 材質はSTPG38 #80である。  
その曲がり部及び合流管等灰が直接あたる所は摩耗による破孔が生じる。当初はこの部分にFCを使用したが、破孔が生じるまでの期間はわずか7~10日であった。現在は当該部分の材質を超硬鋼物FCH11以上にかえており、この結果寿命は約1ヶ月以上となっている。
- (5) 見学時ボトムアッシュの処理を行なっていたが、このホッパから若干の灰がリークしていた。  
又、この時、灰移送管がつまり、大ハンマで管をたたいて、このつまりを解除し正常に復帰した。  
この現象は時々発生することである。
- (6) 本プラントでは排ガス煙道にマルチサイクロンを設けており、排ガス出口含じん量は $0.2\text{ g}/\text{Nm}^3$ 以下の由。
- (7) 尚、H社では、漏洩炭じん・灰じんに対しては電気掃除機を使用しての対処もできるようにしているとのことであった。

### 3. 調査結果の考察

船内の石炭あるいは灰移送のいずれのシステムについても、正常状態で運転されているかぎり、炭じんあるいは、石炭灰の機関室内への漏洩はないものと考えられるが、アンケート／実施調査によれば、炭じん・石炭灰漏洩の可能性及びその対策等について次のことが言える。

#### 3.1 石炭移送システム

##### 3.1.1 メカニカル方式

メカニカル方式の場合、石炭移送系統各所での発じんは避けがたく、船用の場合にはダストタイトケーシングにより移送系統を密閉型にすることは必須と考えられ、また系統内の適当なる箇所でペントファン、バグフィルタ等により排気炭じんして、系統内部を若干負圧に保ち、炭じんの機関室内への漏洩を防止することも必要になると考えられる。

しかし、このような対策を施しても

- 1) 機器シール部、付着品の摩耗あるいは損耗
- 2) 機器ハウジング、シート部、タンク壁の摩耗又は腐食による穿孔
- 3) フレキシブルジョイント、あるいはガスケットの破損
- 4) 振動による接合部のゆるみ

等が生じた場合には炭じん漏洩の可能性がある。

従って系統機器の定期的な点検及びメンテナンスが必要となるが、一方このためにシール等の摩耗部品あるいはフレキシブルジョイントの交換をする時、あるいは、機器の解放、点検、補修時には炭じんが漏洩することが考えられ、これに対し何らかの拡散防止対策が必要となる。

陸上の例ではこれらに対し、ホウキ掃きあるいは電気掃除機等をもって対処しているようであるが、船用に適した方策を考える必要がある。

尚、発じん量自体をできるだけ抑える方法として

- 1) コンベアの移送速度をできるだけ下げる。
- 2) 必要により水噴霧をする。
- 3) タンク内の気体空間はできるだけ小さくする。
- 4) コンベア乗継部等の自由落下距離はできるだけ短かくする。

等が考えられる。

##### 3.1.2 デンスフェイズ空気輸送方式

本方式の場合には、本質的に密閉型であり、機関室への炭じん漏洩の可能性はメカニカル方式に比べ少ないと考えられる。

しかし、メカニカル方式の場合と同様に

- 1) 機器シール部、付着品の摩耗あるいは損耗
- 2) 機器ハウジング、タンク壁の摩耗または腐食による穿孔
- 3) フレキシブルジョイントあるいはガスケットの破損
- 4) 振動による接合部のゆるみ

等が生じた場合、さらに本方式特有のものとして、

- 5) ターミナルボックス、ダンブルバルブ、スイッチバルブのエアシールの破損
- 6) 移送管の摩耗による穿孔

が生じた場合には炭じん漏洩の可能性がある。

定期点検・メンテナンスの必要性、また、機器の解放・点検・補修時の漏洩炭じん拡散防止対策については、メカニカル方式と同様のことが言えるが、本方式における移送管摩耗による炭じん漏洩防

止には、特に管曲がり部における超音波等による定期的な管肉厚のチェックが有効と思われる。

### 3.2 灰処理システム

#### 3.2.1 ドライ真空方式及び空気圧送方式

これらの方につき特筆すべきは配管曲がり部あるいは合流部の摩耗穿孔による灰じん漏洩と思われる。実地調査にあるようにD社においては真空移送を採用していた当時は配管曲がり部の摩耗が激しく毎日のように補修を要したが、これを空気圧送式に替えてからは摩耗はほとんどなくなったとのことであり、一方H社では、真空方式を使用しており、管曲がり部あるいは合流部にFC材を使用していた当時は7~10日位で孔があくのでこれを現在は超硬鋳物に替えているが、依然として耐用日数は約30日位とのことである。

穿孔が生じた場合、真空方式と圧送方式では灰漏洩の程度あるいは影響も異なるであろうし、管内流速等の比較検討をせずして、D社の場合とH社の場合の単純な比較はできないが、上記の如き、両方式の対比は注目に値する。

いずれにしろ、これらの方の場合には、配管曲がり部、合流部の超音波等による定期的管肉厚チェックが有効と思われる。

#### 3.2.2 スラリー方式

本方式については、アンケート回答も少なくまた今回実地調査をした範囲においては、本方式を採用している例はなかったが、クリンカクラッシャについては真空移送方式と同様のことが言えるものの、これ以降のスラリー方式灰移送系統については、管継手部締付不良の場合にそこから若干の灰漏洩がありうるもの、比較的灰漏洩は少ないと考えられる。

## まとめ

本年度の調査により、適正に設計された石炭及び灰の船内移送系統が適正なメンテナンスのもとに、正常状態で運転されるかぎりにおいては、これらの系統から船内環境に影響を及ぼすような炭じんあるいは灰じんの漏洩はないと考えられるが、これらの条件が満たされない場合には、炭じん・灰じんの漏洩の可能性があり、それがおこる状況も各移送方式に特有のものがあることがわかった。

また、漏洩防止に必要な系統機器のメンテナンスを行なう時に、炭じん、灰じんが機関室内に出ることは避けられず、これに対し何らかの拡散防止対策が必要となってくることがわかる。

次年度は以上の如き本年度の調査結果をもとに、漏洩防止対策をさらに詳細に検討し、また漏洩が生じた場合にこれに対処する船用として適当な対策の検討を進めて、船内環境保全の観点から炭じん・石炭灰の漏洩・拡散防止指針を作製することを目的として調査研究を継続するものとする。

### 第3章 石炭関連システムの保守・整備

#### まえがき

メインバンカからボイラまでの石炭移送システムおよびボイラからアッシュタンクまでの灰移送システムの信頼度は、石炭だき船の安定運航に大きく影響を与えるものの一つであるが、石炭および燃焼灰を直接取扱う機器で構成されるものが多く、摩耗、腐食などのトラブルの発生が予想された。しかも、乗組員数は極力削減される傾向にあり、これらの石炭関連システムの保守・整備に関する方針を確立することは、石炭だき船建造に際して極めて重要なこととされた。

したがって、アンケート調査を実施するとともに、陸上用ストーカだき石炭ボイラの運転状況を実施調査して、石炭関連システムの現状を調査した。

#### 1. アンケート調査

##### 1.1 調査要領

アンケート調査は下記を範囲とした。

- 対象船 ストーカだきボイラ搭載船として、できるだけ 130,000 積荷重量屯バルクキャリヤに近いものとする。
- 対象石炭 0～35mm の中塊炭とする。
- 石炭移送システム メカニカル式（ベルトおよびパケットエレベータなどの組合せ）およびデンスフェイズ式空気輸送の 2 種類とし、範囲はメインバンカからボイラ付スプレッダ入口（スプレッダ本体は含まず）とする。
- 灰移送システム ドライ真空方式とスラリー（ボトムアッシュ）移送方式の 2 種類とし、範囲はボイラ下クリンカ・ホッパおよび集じん機ホッパ下部（ホッパは含まず）からアッシュタンク又は船外排出までとする。

アンケート調査は、それぞれのシステムおよび方式を構成する主要機器について、形式、点検回数、必要交換部品、予想交換原因、船内交換の可否、所要交換時間、予備品数（2 年分）および耐用年数について行なった。また、石炭移送管および灰移送管など摩耗が主要な問題と想定されたものについては、材質、厚さについても行った。

アンケート回収状況は、造船会社 6 社、関連機器メーカー 13 社、ユーザ 3 社であった。

##### 1.2 石炭移送システムのアンケート調査結果

###### 1.2.1 メカニカル方式

ここでは、デンスフェイズ空気輸送方式に対応するものとして、コンベヤやパケットエレベータなどを組合せた方式を総称してメカニカル方式という。主要な構成機器として、バイブレーター（メインバンカ付）、コールゲート（メインバンカ付）、石炭払い出し装置、コンベヤ、コールクラッシャ、コールエレベータ、デイリーサービスパンカ、石炭計量器およびコールショットが想定される。

しかしながら、造船会社のアンケート回答では、ほとんどの造船会社がデンスフェイズ空気輸送方式の採用を検討していることがわかる。

なお、上記構成機器のうち、コールクラッシャについては、すべての造船会社が、石炭粒度調整をバンカリング前に陸上にて行ない、本船では装備しないことを原則としている。

以下、各主要機器についてのアンケート調査結果を示す。

###### (1) バイブレータ

設備する必要ありとする回答が多いが、ホッパの形状を考慮することにより不要とする回答が 1

件あった。

バイブレータ形式としては、機械式又はエアショットガン式のいずれかに優劣づけされていない。  
(なお造船会社の回答の機械式とメーカー回答の電動式又は電磁式とは同意と判断する。)

保守・整備は軸受部等の摩耗部を中心に点検を行なう必要があり、エアショットガン式では、これにノズルの腐食・摩耗の点検を必要としている。点検頻度は定期毎から1回／月にまで巾が広いが、いずれの回答も短時間での船内部品交換が可能としている。

#### (2) コールゲート(メインパンカ下)

コールゲートの形式は、スライドゲートを回答した例がほとんどであるが、メーカー回答にロータリバルブが1件あった。

点検内容としては、作動、摩耗、腐食の順で、中検毎の点検を回答したもののが最も多い。しかしメーカー回答の中には1回／1週の点検を回答しているものもあった。

交換部品としては、駆動部、ゲートプレート、ケーシングがあげられているが、シール部に対する配慮も必要としている。いずれの部品交換も船内で可能である。

#### (3) 石炭払出し装置

回答されたものは、すべて石炭払出し装置の設置は必要であるとしている。形式としては、バイブレーティングフィーダが最も多く(5件)、これにドラッグチェーンコンベヤおよびスクリューコンベヤが同じ件数(3件)で続いている。バイブレーティングフィーダは、他の形式に比べて点検回数は少なく、中検又は定期毎としているが、スクリューコンベヤでは、中検毎と1回／月がそれぞれ1件づつ回答され、ドラッグチェーンコンベヤは1回／月と1回／週がそれぞれ1件づつ回答されている。

点検内容としては、いずれの形式においても摩耗、腐食、作動の順になっているが、メーカー回答に、バイブレーティングフィーダでは異常音および各部のゆるみが、また、ドラッグチェーンコンベヤでは付着除去があげられている。

部品の交換については、いずれの形式についてもほとんど船内交換可能としているが、バイブレーティングフィーダのメーカー回答に板ばねの船内交換について、また、スクリューコンベヤの造船所回答にトラフの船内交換についてそれぞれ1件づつではあるが不可との回答があった。

部品の交換所要時間は、バイブレーティングフィーダでは2～4時間、スクリューコンベヤではトラフおよびスクリューを除いた部品は2～4時間、ドラッグチェーンコンベヤでは、メーカーより1件しか回答は得られていないが4時間×3人～8時間×4人としている。

#### (4) コンベヤ

造船会社の回答1件を除いて、すべてメーカーおよびユーザよりの回答である。形式は平ベルトが最も多く、次いでドラッグチェーンとなっている。その他、トラフ型ベルト、振動コンベヤ、耳付ベルト、フレクスベルトがメーカー回答としてあげられている。

点検内容は、摩耗をあげた回答が多く、作動や腐食も回答されている。平ベルトについてはユーザから蛇行の点検があげられている。

点検頻度としては、平ベルトに対するユーザの回答に2回／月～1回／月があり、船用として採用する場合に十分注意を要する。

#### (5) コールクラッシャ

すべてメーカーよりの回答であり、形式もハンマタイプ、インパクトタイプ、ロールタイプと分かれている。点検内容はいずれの形式とも摩耗が主である。そして、各メーカーとも1回／月～1回／週と点検頻度を多く回答している。

#### • コールエレベータ

メーカーよりバケットエレベータについて3件の回答を得たが、点検内容としては摩耗がほとんどで、付着除去についての点検を回答しているものがある。点検頻度は、中検毎から1回／週まで幅が広い。

部品の交換については、ケーシング、ガイドレール以外は船内交換可能となっているが、全体的に交換所要時間は多くなっている。

#### (6) デイリーサービスパンカ

パンカホッパ部のライニング材は、ステンレスもしくはステンレスクラッド鋼を採用するものが多いが、造船会社の回答には、プラスチックを回答したものが1件、全くライニングを考慮しないと回答したものが1件あった。耐用年数として、造船会社はパンカ、ライニング材とも10年以上を計画しているが、メーカ回答では、ライニング材の耐用年数を4年としたものもある。

点検内容は、腐食、摩耗であり、点検頻度も定期もしくは中検毎となっている。

注目すべき回答として、ユーザより、ライニング材は一切使用せず、内面を腐食防止のための塗装のみとし、点検内容として摩耗も考慮せず、しかも20年の耐用年数を計画しているものがあった。

#### (7) 石炭計量器

設ける必要について、造船会社の回答は、あり、なしが半分に分かれているが、ユーザの回答では、すべて設備している。しかし造船会社が設けないと回答している理由は、船用として使用する場合の信頼性について疑問を理由にしているものがあった。

形式としては、連続式と回答したものが多い。

定期内容は、作動を上げるもののが一番多く(6件)、次いで摩耗(3件)、腐食(2件)となっているが、機器の性格上、秤量精度の点検を回答するものが3件あった。点検頻度は、定期毎～1回／週まであり、ユーザ回答で同じ形式(連続式)であっても、点検頻度の差が大きい。また連続式のメーカ回答に、作動、異常音、ベルト蛇行を毎日点検するというものがあった。

船内での部品交換については、いずれの回答も可能としており、交換所要時間も2～8時間となっているが、メーカ回答の1件のみ3人×2時間のものがあった。

#### (8) コールシート

材質としては、造船会社の回答はステンレスとしている。メーカおよびユーザ回答では、ステンレスと軟鋼がほぼ分かれている。

耐用年数は、造船会社は10～15年を計画しているが、メーカはステンレスで3～10年、ユーザはステンレスで20年、軟鋼で5～10年を計画している。

主要な点検内容は、摩耗および腐食となっているが、点検頻度は、中検毎から1回／週までの幅がある。

### 1.2.2 デンスフェイズ式

空気輸送方式としては、デンスフェイズ式とリーンフェイズ式があるが、耐摩耗特性、低騒音性などで、デンスフェイズ式の方が優れているとされたので、アンケートもデンスフェイズ式についてのみ行なった。主要な構成機器としては、バイブレータ(メインパンカ間)、コールゲート(メインパンカ付)、石炭払い出し装置、デンスペッセル、石炭移送配管、バグフィルタ、ディリーサービスパンカ、石炭計量器およびコールシートが想定される。なお、バイブレータ、コールゲート、石炭払い出し装置、ディリーサービスパンカ、石炭計量器およびコールシートは、メカニカル方式の項に示したもので、本項では省略した。

以下、デンスフェイズ式石炭移送装置を構成する主要機器のうち、メカニカル方式の項に示したも

の以外の機器についてのアンケート調査結果を示す。

#### (1) デンスペッセル

耐用年数として10～15年を計画するものが多い。また点検頻度は造船所回答で1回／3ヶ月～1回／6ヶ月としているが、メーカ回答では、定検毎とする回答もあり、大きな見解の相違が見られる。

点検内容は、腐食および摩耗が主で（各7件）、次いで作動（5件）となっているが、メーカ回答に溶接部およびボルトの接合部の点検をあげているものがある。

交換部品の主なものは、バルブであり、次いでパッキン等シールがあげられているが、いずれの部品も船内交換可能であり、造船会社回答の1件を除いては、部品交換所要時間は1～3時間となっている。

#### (2) 石炭移送配管

##### ・ バイブ

造船会社回答の多くは、耐用年数を2～5年とし、材質も軟鋼で計画しているが、1件だけステンレスで15年の耐用年数を計画するものがあった。メーカ回答においても、軟鋼を計画しているものが多い。

点検内容は、腐食、摩耗であるが、主には摩耗である。点検頻度は1回／3ヶ月から中検毎になっているが、造船会社の多くは中検毎を計画している。

交換はいずれも船内交換可能としているが、造船会社の回答で、中検時ドック入りをして行なうと回答しているものがあった。

##### ・ ベンドピース

造船会社の回答中の3件は軟鋼として耐用年数を2～3年と計画しているが、2件はステンレスで4年以上の耐用年数を計画している。

メーカ回答においても、軟鋼として耐用年数を2～4年としているのが多い。

点検内容および点検頻度は、バイブと同じである。

##### ・ スイッチバルブおよびダンブルバルブ

耐用年数については、造船会社の回答は2～3年を、メーカの回答は10～15年、ユーザの回答では6年を計画している。

点検内容は、摩耗、腐食、作動となっており、点検頻度は、中検毎から1回／3ヶ月となっている。多くの回答は、スイッチバルブおよびダンブルバルブの点検頻度をベンドピースの点検頻度と同じか、もしくは多くするようになっている中で、メーカ回答の1件のみ少なく回答しているものがあった。

#### (3) バグフィルタ

フィルタ材質については、テトロン、ポリエステルを回答したものが、それぞれ3件で最も多い。

点検内容は、フィルタのつまりを上げたものの7件で最も多く、以下、作動（4件）、摩耗（3件）、腐食（2件）となっている。点検頻度は、中検毎とするものが多いが、造船会社の回答で1回／週が2件あった。

主要な交換部品としてはフィルタエレメントで、交換原因はつまりをあげるものが多いが、メーカ回答に、フィルタエレメントの摩耗をあげるものがあった。フィルタエレメントの交換所要時間は1本当り10分～1時間とするものがほとんどであった。

### 1.3 灰移送システムのアンケート調査結果

灰移送システムとしては、コンベヤ等の組合せで構成するメカニカル方式空気流を利用した乾式の空

気輸送方式および水流を利用した湿式のスラリー輸送方式などが想定される。このうち、メカニカル方式および空気輸送方式のデンスフェイズ方式についての保守・整備は、石炭と燃焼灰の違いによる耐用年数、点検頻度にいくらかの差が予想されるものの、基本的には石炭移送システムとはほぼ同じであろうと判断された。したがって、灰移送システムのアンケート調査は、ドライの真空方式と、湿式のスラリー輸送方式について実施した。

### 1.3.1 ドライ真空方式

ドライ真空方式の構成機器としては、クリンカクラッシャ、灰移送配管、サイクロンセパレータ、バグフィルタ、真空発生装置、アッシュサイロが想定される。

以下、各構成機器についてのアンケート調査結果を示す。

#### (1) クリンカクラッシャ

回答1件を除くすべての造船会社は、クリンカクラッシャを設備する必要ありとしている。形式はメーカ回答の1件以外は、すべてロールタイプとしている。

点検内容は、摩耗、作動、腐食、作動の順であるが、ユーザ回答にシャフト変形が回答されたものがある。点検頻度としては、定期毎から1回／週まで種々回答されているが、中検毎が最も多い。

船内交換については、造船会社の回答で歯の交換およびユーザ回答でシャフト交換が不可とあった。しかし一般に部品交換は他の設備機器の場合よりも所要時間は長くなっている。

#### (2) 灰移送配管

##### ・パイプ

多くの造船会社は、耐摩耗鋼を使用して耐用年数を10～15年計画としている。ユーザの回答では軟鋼で6ヶ月とし、パイプを消耗品と考えている様子がうかがえるものがあった。

点検内容は、摩耗および腐食で1回／3ヶ月から1回／2年となっているが、造船会社回答の多くは1回／年としている。

交換は船内可能としているが、造船所の回答でドック入りが必要とするものが1件ある。

##### ・ベンドピース

耐摩耗の特殊鋼を計画するものがほとんどで、耐用年数を1～5年としている。しかしユーザの回答で超硬鋳鉄で1ヶ月と回答されているものがある。部品の船内交換はいずれの回答も可能となっている。

##### ・エアインテークバルブ

造船会社回答は、1年(スプリング)～5年の耐用年数の計画であるが、ユーザ回答で鋳鉄にて20年を回答しているものがあった。

点検内容も、造船会社回答は主に作動であるが、メーカ、ユーザ回答は摩耗となっている。点検頻度は1回／年が主である。

##### ・スイッチバルブ

造船会社回答で、スイッチバルブを設備しないと回答しているものが1件ある。耐用年数は、造船所回答は1～2年、ユーザ回答は1年となっているが、メーカ回答は10年を計画している。

点検内容は摩耗が主で、他に作動、腐食、リークが回答されている。点検頻度は1回／3ヶ月～1回／1年であるが、1回／年が主である。

##### ・バキュームブレーカ

耐用年数として造船会社は2年、メーカは10年、ユーザは20年を計画している。

点検内容は、作動が主で摩耗、リークが回答されている。点検頻度は1回／6ヶ月とする回答も1件あるが、他はすべて1回／年となっている。

エアインテークバルブ、スイッチバルブ、バキュームブレーカとともに船内交換は可能となっている。

### (3) サイクロンセパレータ

形式としては、単サイクロン(4件)とマルチサイクロン(3件)となっているが、メーカおよびユーザ回答は単サイクロンとなっている。サイクロンのライニングは、造船会社は必要なしとしているが、メーカ、ユーザは必要としている。

点検内容は摩耗であるが、造船会社の回答にダストの付着を回答しているものが2件あった。点検頻度はマルチサイクロンの場合はライニングを設けず1回／週～1回／月、単サイクロンではライニングを設けて中検毎としている。しかしユーザの回答では、単サイクロンでライニングを行なっているにもかかわらず点検頻度は1回／3ヶ月である。

交換部品はマルチサイクロンでは内筒、外筒、サイドベーンであり、所要時間も30分～1時間、単サイクロンの場合は、ライニング材で所要時間も6～8時間となっている。

### (4) バグフィルタ

フィルタ材質としてテトロン、ポリエステル、ナイロン(ノーメックス)が回答されている。耐熱性を考慮するもの2件の回答があった。

点検内容は、フィルタのつまりが最も多く(7件)、次いで摩耗、作動(それぞれ3件)、腐食(2件)となっている。点検頻度は1回／週から中検毎となっている。ユーザ回答は2回／月であった。

交換部品の主要なものはフィルタであるが、造船所およびメーカ回答では交換所要時間は15分から3、4時間×2人(フィルタ1本当り10分の回答あり)で、船内交換可能となっているが、ユーザ回答では、交換所要時間は48時間で船内交換不可となっていた。

### (5) 真空発生装置

真空発生装置の形式として造船会社の回答は、ハイドロバクターが3件、ナッシュポンプが2件となっていた。

点検内容は、いずれの形式についても、摩耗、腐食、作動となっているが、ナッシュポンプについてのユーザ回答は作動のみであった。点検頻度はナッシュポンプの場合、1回／週から中検毎まであるが、ユーザ回答は2回／月となっていた。一方、ハイドロバクターは1回／3ヶ月から中検毎となっていた。

船内交換については、ナッシュポンプの回答は1件しかないが、ロータおよびコーンがあげられており、いずれも船内交換可能である。ハイドロバクターはノズルが主なもので、船内交換可能である。

### (6) アッシュサイロ

多くの造船会社は、10年以上の耐用年数を計画している。また、造船会社の回答でステンレスのライニングを設けると回答したもの2件を除いてライニングは設けないものが多い。ユーザ回答はすべてライニングなしで10年以上の耐用年数を回答している。

点検内容は、摩耗、腐食である。点検頻度も造船所、メーカ回答は、中検毎および定検毎となっているが、ユーザ回答の1件は1回／月となっている。

## 1.3.2 スラリー輸送方式

造船会社の回答で2件、スラリー輸送は考えていないとしたものがあった。

スラリー輸送方式の主要構成機器として、クリンカクラッシャ、スラリーポンプ、スラリータンク

が想定される。このうち、クリンカクラッシャは、すべての回答で設置する必要ありとしていた。クリンカクラッシャのアンケート結果は、1.3.1項のクリンカクラッシャにまとめた。

以下、スラリーポンプ、スラリータンクについてのアンケート調査結果を示す。

(1) スラリーポンプ

形式としては、いずれもジェットポンプとなっている。

点検内容は摩耗、腐食であるが、点検頻度は中検毎であった。

主要な交換部品は、ノズル、スロートおよび入口金物があげられており、交換所要時間は2時間×2人から6時間で、船内交換は可能となっている。

(2) スラリータンク

計画耐用年数は、造船会社の回答で15～20年、メーカ回答で10年となっている。造船会社の回答でエポキシ塗装を回答しているものがある。

点検内容は腐食、摩耗であり、点検頻度は中検もしくは定検毎である。

なお、アンケート調査とりまとめ結果の原紙は、資料2.3.1「石炭関連システムの保守・整備アンケート調査結果」として、(社)日本造船研究協会事務局が保管している。

## 2. H社の実地調査

当研究部会にて、H社のストーカだきボイラおよびその石炭関連システムの運転保守状況を調査した。

石炭移送および灰処理装置について、貴重な調査結果が得られたので、こゝにまとめた。

### 2.1 石炭移送システム

石炭移送装置の運転時間は、毎朝1～2時間程度であり、デイリーバンカのレベルを目視して手動発停を行なう。

デイリーバンカからコールシートへの供給は、コールシートのレベルスイッチにより、コールスケールを自動発停させることにより行なわれ、同時に供給量を自動的に計量する。

保守状況は次のとおりであった。

コンベア 寿命は、ペアリング2年、ベルトクリーナ半年、ベルト8年で摩耗し交換する。

点検は摩耗、腐食、ベルトの蛇行と毎日又は毎月2回行う。

デイリーバンカ 内面は2年毎に下塗のうえ、ポリウレタン塗装施行、レベル境界面近くは2mm/10年位の腐食あり、その他は腐食、摩耗なし。

コールスケール 作動状況を2年毎に点検。

ペアリング、ベルトクリーナ、ベルト、ロールの摩耗あり、平均2年位で交換。

コールシート 昭和46年ボイラ運転開始以来補修なし。

点検は摩耗状況を、毎月1回施行。

船内での保守は、コンベアベルトおよびデイリーバンカ内面塗装を除けば、ほゞ半日以内に補修が可能であると考えられる。

デイリーバンカ内面は、より耐摩耗性のある材料とするか、または、容易に船内で補修できるものにすべきであろう。

コンベアは、ベルト交換に約2日程度必要であり、船内では防じんケーシング付となり、ますます交換時間が長くなる傾向になるため、より容易な取替え方法を考慮する必要がある。

点検は回転摺動部分の摩耗、腐食と重点的に行い、コンベアとコールシートは月1回、デイリーバンカとコールスケールは年1回程度チェックすればよいと考えられる。

なお、運転操作面では、船舶の場合、デイリーパンカの遠隔レベル表示によるコントロールルームからの遠隔発停または自動発停とするのが望ましい。

また、貯炭場からコンペアの石炭の落し込みは、少量の石炭をブルトーザにて行なわれていたが、船では大きなバシカから切り出す設備を設けることになり、石炭の切出口でのつまりや、発熱防止などの対策を考慮するとともに、もっと自動化する必要がある。

## 2.2 灰移送システム

灰出しは約3時間毎に行い、真空ポンプ作動後約10~15分間にて、システムの真空が600~650mmHgとなる。所要時間は、ダクトコレクタのフライアッシュ5~6分、ボトムアッシュ5~10分、クリンカ20~30分、合計30~40分である。

灰移送中の配管内真空は、100~400mmHgであり、クリンカはクラッシャにて粉碎後、移送量を手動調整する。

クリンカの移送管への落し込みは、クラッシャ下のゲート弁をレバーにて、真空度を見ながら手動操作する。

又、クリンカクラッシャ入口にて、大きなクリンカのつまりが発生していないかどうかを常時監視し、クリンカのつまりがある場合、鉄棒で碎く。

クリンカの排出時、落し込み量が多すぎ、移送配管内にクリンカのつまりが発生したので、移送配管をハンマでたたいて回った所、正常の真空に戻った。（ハンマでたたいてもつまりがとれない場合は、ベンド部のふたをとって棒でつつくこともある。）

吸引された灰は、全て屋外の灰サイロ上部に設けられたサイクロンセパレータおよびバグフィルタで灰を分離した後、灰サイロに貯められる。

灰サイロの灰は、定期的に灰サイロ下部ホッパからトラックへ落し込み廃棄される。

なお、灰の発生量および移送量の実状は、次のとおりである。

灰発生量(2缶分)		実灰移送量(3時間毎に30分間運転)
夏期	0.5~0.6 TON/H	3.5~3.6 T/H
冬期	1.1~1.4 TON/H	6.6~8.4 T/H

保守状況は次のとおりであった。

クリンカクラッシャ 定検毎にペアリング、歯の摩耗、シャフトの変更および作動を点検。

これらの部品の交換は、約1年毎に行なわれ、歯シャフトの交換所要時間は2~3日必要である。

ダクトコレクタ 定検毎に掃除し、内部腐食、摩耗を点検する。

昭和46年度設置以来、特に部品の交換はない。

灰サイロ 同上

サイクロンセパレーター 3ヶ月毎に内部の摩耗点検

ライニング中筒 3ヶ月毎に交換、交換所要時間 8時間

スイングダンパー " " 1時間

バッキン 4ヶ月毎に交換、 " 1時間

パワーシリンダ 8年毎に補修、 " 1時間

バグフィルタ 1ヶ月毎に2回つまり、作動、フィルタの破損を点検

フィルタ 金網1年毎に交換、交換所要時間 6日

バッキン 金網1年毎に交換、交換所要時間 1日

真空ポンプ 1ヶ月毎に1回作動状況点検、交換部品は特になし

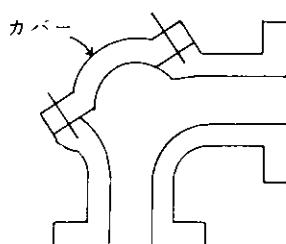
移送配管 直管 3ヶ月毎に点検、6ヶ月毎に交換  
 曲部管 1ヶ月毎に点検、1ヶ月毎に交換  
 スイッチ弁 1年毎に点検、1年毎に交換  
 エア入口弁、バキュームブレーカは、1年毎に点検、耐用年数 20年

H社のストーカだきボイラは、昭和46年に運転開始以来、保守面で最も心掛けなければならないことは、灰移送管の曲り部の摩耗である。この曲り部には、下図の如く、超硬鉄製とし、摩耗が激しい部分は17mm厚さのフタを設け、容易に取り換える構造としており、約1ヶ月（通算約120時間）で交換されている。

船用としては、このフタの予備を多数支給する方法も考えられるが、曲り管の配置は、容易にフタが交換できるようにするとともに、曲り部の数をできるだけ少なくするような配管を考慮する必要がある。

または、より耐摩耗性のある材料を、ライニングしたものとし、少なくとも1年以上の寿命を持たせるなどの研究が必要であろう。

なお、灰出し作業は、手動にて2人の作業員から3時間毎に行っているが、船用では、灰出しインターバルを伸ばすようクリンカホッパの容量を大きくする必要があり、また、配管のつまり対策を講じた自動化を計るなどの信頼性の向上と省人化が課題である。



### 3. 調査結果の考察

石炭移送システム、灰移送システムに共通する主要な点検内容は、摩耗、腐食である。そして、それぞれの機器の特徴に応じて、作動、つまり、その他必要な点検項目が追加される。点検頻度は、同じ機器でも、造船会社、メーカ、ユーザで回答にかなりのバラツキがあった。すなわち、

メカニカル式石炭移送システムでは、石炭計量器の1回／日～定検毎をはじめとして、

コールゲート、ドラッグチェーン式石炭払出し装置、コールクラッシャ、コールエレベータ、コールショートが1回／週～中検毎。

バイブレータ、スクリューコンベヤ式石炭払出し装置、平ベルトコンベヤが2回／月～定検毎。

バイブレーティングフィーダ式石炭払出し装置、ディリーサービスパンカが中検毎～定検毎になっている。

デンスフェイズ方式石炭移送システムでは、

バグフィルタが、1回／週～中検毎

石炭移送配管が、1回／3ヶ月～中検毎

デンスペッセルが、1回／6ヶ月～定検毎となっている。

ドライ真空方式灰移送システムでは、

クリンカクラッシャ、マルチサイクロン形サイクロンセパレータ、バグフィルタ、ナッシュポンプ式真空発生装置が1回／週～定検毎。

アッシュサイロが1回／月～定検毎。

灰移送配管、単サイクロン形サイクロンセパレータ、ハイドロバクター式真空発生装置が、1回／3ヶ月～定検毎となっている。

スラリー輸送式灰移送システムでは、スラリーポンプ、スラリータンクとも中検毎～定検毎となっている。交換部品についての耐用年数については、造船会社の回答では、一般に中検もしくは定検までを考えているようであるが、実際の耐用年数としてのメーカおよびユーザの回答との間にずれが認められるものがあった。その最たるものは、ドライ真空方式灰移送システムにおける灰移送配管のベンドピースで、造船会社回答では、1～5年の耐用年数を計画しているが、ユーザの回答では1ヶ月となっている。

また、H社の実地調査結果によって、ベルトコンベアの蛇行、クリンカクラッシャのシャフト変形、灰移送配管のつまり、など予想しなかった点検事項があり、灰移送配管のベンドピースの寿命も17mm厚さの超硬鋼物にて、1ヶ月程度であった実状が判明した。

これら造船会社の回答とメーカおよびユーザの回答、実地調査結果の相違点があったのは、造船会社の経験不足、稼働時間や配管内流速などの計画のバラツキによるものと考えられる。

#### まとめ

今年度は、石炭関連システムの保守・整備に関する現状を調査することを目的として、アンケート調査および実地調査を実施した。その結果、各造船会社、メーカ、ユーザの多大の協力を得て初期目的を達成することが出来た。この調査結果に基づいて、石炭関連システムの保守・整備に関する指針をまとめる。

#### H社 石炭関連システムの主要目

##### 1. 石炭移送システム（システムの略図は、図2.3.1参照）

移 送 方 式	ベルトコンベア方式
貯 炭 場	鉄骨コンクリート造平屋2棟 1358.7m <sup>2</sup>
	貯炭量 最大 3200 TON、常時 1500～2000 TON
ベルトコンベア	平形4段式（手動発停）1本 容量 100 TON/H、約 30 m、速度 80 m/min
石炭粒度選別機	振動スクリーン式（手動発停）1台 選別粒度 25 mm
デイリーバンカ	鋼板溶接製（内面下塗のうえポリウレタンライニング）1台 容量 280 TON、ホッパー部に振動機付
コールスケール	重量式（ベルト式） 2台（1台/缶） 容量 6 T/H 台（コールショートレベルによる自動発停）
コールショート	ステンレス製（厚さ 6 mm）2本（1本/缶） 取付角度 約 60 度
使 用 石 炭	道内炭（粉炭）サイズ 25 mm以下 発熱量 6000 kcal/kg 消費量 夏期 70～80 TON/D 冬期 150～180 TON/D

##### 2. 灰処理移送システム（システムの略図は、図2.3.2に示す）

移 送 方 式	真空吸引式
クリンカクラッシャ	ロール式 2台（1台/缶）
シャ	容量 10 T/H
ダストコレクタ	マルチサイクロン 2台（1台/缶） 出口含じん量 0.2 g/Nm <sup>3</sup> 以下

灰 サ イ ロ 鋼板製 立円筒形 1台  
容量 約 80 T

サイクロンセパ 単筒サイクロン 1台

レータ 内面耐摩耗鋼ライニング( 6 mm t )

バグフィルタ マルチ形 1台  
ノーメックス耐熱フィルタ付

真 空 装 置 ナッショ形真空ポンプ 2台( 1台予備 )  
容量 36.5 Nm<sup>3</sup>/min 700 mmHg VAC.

移 送 配 管 直管部 鋼管( 10 mm t ) 曲り部 超硬鋳物( 17 mm t )  
スイッチ弁 鋳鉄( 17 mm t )

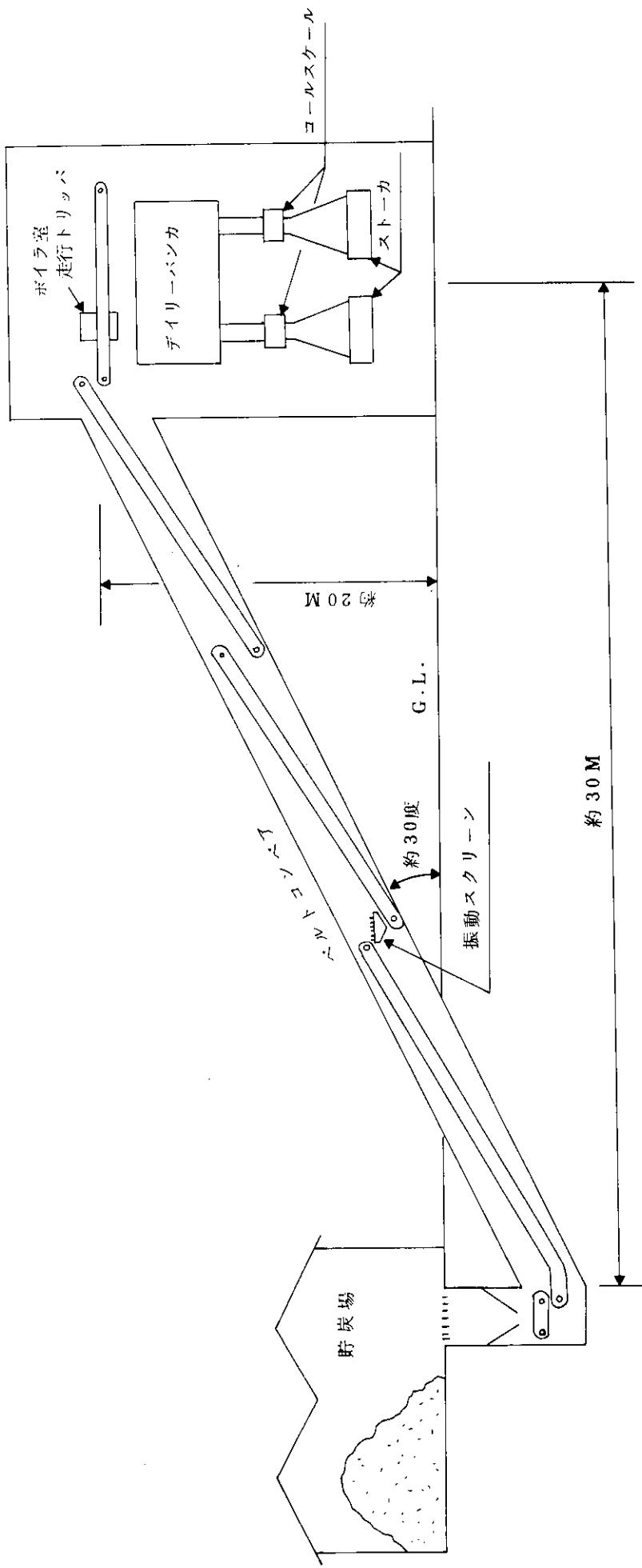


図 2.3.1 石炭移送装置

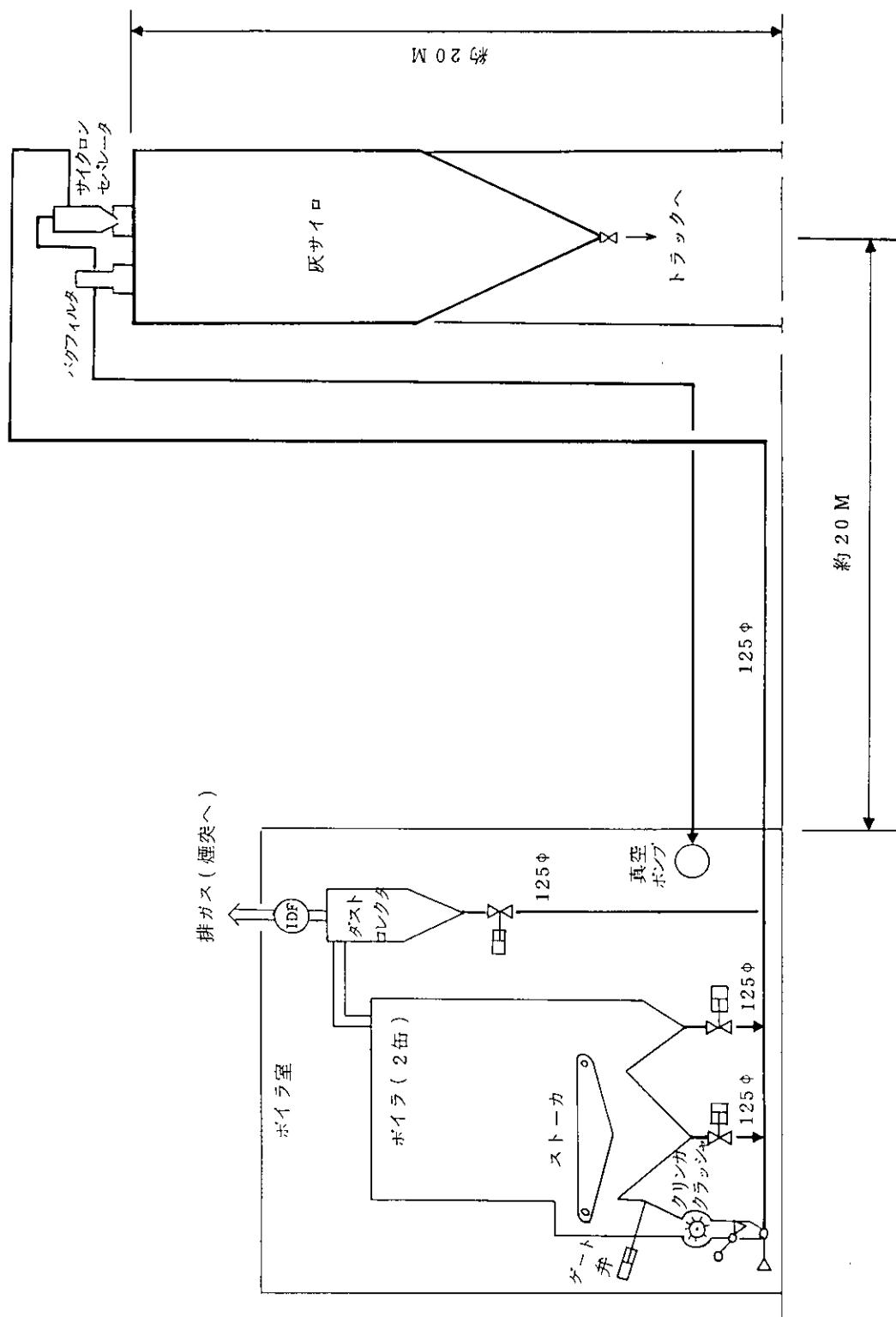


図 2.3.2 灰処理装置

## 第4章 石炭関連システムの監視・計測・操作

### まえがき

石炭および石炭灰の船内での貯蔵、輸送時の各関連システムの監視・計測・操作は船内での環境保全の観点から、非常に重要である。

こゝでは、まず必要な対象項目を選定し、使用可能な方式を調査し、更にメーカー、造船会社およびボイラーアーチェーに対して、アンケート調査を実施し、その内のユーザ数社の実地調査を行ない、各方式の採用の可能性および問題点を検討した。

### 1. 調査対象項目の選定

本調査の対象項目の選定にあたり、現在、既に発行されている船級協会の石炭だき船建造に対する要求項目を表2.4.1の様に整理した。

本表より対象項目として1) レベル、2) 温度、3) ガス(一酸化炭素およびメタンガス)検知を取りあげた。更に要求されていないが、海上運転時必要となる4) 石炭重量を加えた4項目について調査することとした。

### 2. 対象項目の測定方式

ここでは、調査対象項目の粉、粒、塊体の測定方式について概略説明する。

#### 2.1 レベル計

測定方式が極めて多く、最適な方式を決定することは大変困難であるが、こゝでは、一般に粉、粒、塊体に対して適当と考えられる方式について、その測定原理、特徴、および注意点について調査した。

##### 2.1.1 静電容量式

###### (a) 測定原理

タンク内部に取付けた電極に、物質が接触または接近すると、石炭や石炭灰の誘電率は空気(比誘電率=1)より大きいので、電極とタンク壁間の静電容量が増加する。これを電気信号として取出し、ON/OFF指示する。

また、静電容量は、電極とタンク壁との間の物質のレベル(高さ)に比例するという性質があるので、この静電容量変化を、電気信号として、連続指示する。

###### (b) 特徴

- (1) 可動部分が無いので寿命が長い。
- (2) 多種類の粉・粒・塊体に使用可能である。
- (3) 本質安全防爆型が採用可能である。
- (4) 高圧、高温、腐食、衝撃等に対して対策を立て易い。
- (5) 感度調整可能である。

###### (c) 注意点

- (1) 対象物質の比誘電率の変化に注意する必要がある。
- (2) 導電性物質の付着に注意が必要である。
- (3) 微粉体の場合には、一般に見掛け比重が小さく、空気の含有量が多いので比誘電率が小さくなる。このため、わずかの変動に対して誤差が出やすい。
- (4) 粉体を連続指示する場合、タンク上部、下部での圧力の違いにより、比誘電率が異なり、直線性が得られにくく、誤差が生じる。

- (5) 塊体時は、取付けにあたって、電極の強度面について検討を要する。特に連続指示の場合、電極が長くなるので、強度的に不向きである。
- (6) 水分や付着物質の影響を受け易いので、電極の材質等の検討が必要である。
- (7) 温度変化によって比誘電率が変化するので、変化がある場合は補正装置が必要である。

### 2.1.2 超音波式

#### (a) 測定原理

超音波の反射を利用したもので、センサから発信された超音波が、測定物から反射して再びセンサにもどるまでの時間を測定して、レベルに換算する。センサ1台で発信器、受信器を兼ねているので、発信、受信を交互に繰り返して測定する。

センサで測定された時間(レベル)は、一定の電圧、電流信号に変換し指示する。

#### (b) 特徴

- (1) 無接触測定のため、摩耗が無く、面倒な保守が不要である。
- (2) 機械的可動部分が無く、構造が簡単である。
- (3) 対象物の性状に影響されないので安定した測定ができる。
- (4) 水蒸気や気体中を浮遊する塵の影響を受けにくい。
- (5) 測定範囲が長く、最大30m位まで可能である。
- (6) 瞬時レベルが連続的に計測できる。
- (7) 測定範囲を短かくすれば、本質安全防爆可能である。
- (8) 高価である。

#### (c) 注意点

- (1) 対象物の反射効率の考慮が必要である。
- (2) 特に粉体の場合は、測定スパン、粒度、安息角等で安定性が異なるので、十分にテストするところが望ましい。
- (3) 音速が気温によってかなり変化するので、補正装置が必要である。
- (4) 積込時の音波を受信して誤指示するものがあり、音波帯域を変えるか、ノイズ除去回路を設ける必要がある。

### 2.1.3 重錘サウンディング式

#### (a) 測定原理

重錘付きテープ(またはワイヤ)をモータで巻き下げ、被測定物に到達した時のテープ(またはワイヤ)の張力の変化を機械的に検出する。レベル信号は重錘下降または上昇に要したテープ(またはワイヤ)の繰出し長さに応じたブーリの回転数を計数し、パルスを発信する。

この信号を電磁カウンタで受け、レベル値として表示する。

#### (b) 特徴

- (1) 最大70mまで測定できる。
- (2) 小形、軽量のため、取付、保守が容易である。
- (3) 機械式なので、対象物の湿度、粒径、混合比等に影響されない。
- (4) 対象物の搬入、搬出時の流動による影響を受けない。

#### (c) 注意点

- (1) 船の動搖による影響を受けやすい。
- (2) 可動部(機械部)がある。摺動する部分の耐摩耗、耐腐食性を考慮する必要がある。
- (3) 間欠的検出である。

#### 2.1.4 回転翼式

##### (a) 測定原理

翼の回転が被測定物によって拘束されることによって生じるトルクを検出することによってレベルを表示する。

##### (b) 特 徴

- (1) 一点検出である。
- (2) 小形、軽量のため、取付、保守が容易である。
- (3) 安価である。

##### (c) 注意点

- (1) 粒度により、軸径の選定、軸、羽根の保護対策（例えば保護カバー）が必要である。
- (2) シール部のつまりの可能性があるので、定期点検が必要である。
- (3) フライアッシュのような超微粉体の場合、翼埋没時でも回転の恐れがある。モータトルクを変えたり、翼を大きくする必要がある。

#### 2.1.5 振子式

##### (a) 測定原理

タンクの上部より、懸垂されたおもりまたは懸垂板まで、粉粒体レベルが上昇して、鉛直線のまわりに一定角度以上傾斜すると、マイクロスイッチが閉となり、レベルが達したことを表示する。

##### (b) 特 徴

- (1) 一点検出である。
- (2) 構造が簡単で作動が確実である。
- (3) 安価である。

##### (c) 注意点

- (1) 船の動搖の影響を受け易い。
- (2) シール部のつまりの危険があるので、定期点検が必要である。

測定方式としては、上に述べた外に導電率式、音叉式、放射線式、ピストン式等があるが、適用範囲が限られたり、非常に高価なので省略した。

### 2.2 溫 度 計

測定方式は多数あるが、こゝでは石炭庫やホッパ内の温度計測には、船の動搖や振動のみならず、石炭搭載時の衝撃や粉じんの影響を受けにくい熱電対式温度計および赤外線輻射式温度計について調査した。

#### 2.2.1 热電対式

##### (a) 測定原理

2種の異なる金属線の両端を接合し、電路をつくり、両接点を異なった温度に保つと、この回路に熱起電力を生じるので、その電位差を測定して2接点の温度差を知ることができる。この原理による温度計をいう。熱電対の材料として、熱起電力が大きく、かつ安定で長時間の使用に耐え、温度の上昇と共に熱起電力が連続的に増加すること、耐熱性で高温ガスに対し耐食的であること、電気抵抗および熱伝導率が小さいことなどを条件として選ぶ。普通使用される材料と測定温度範囲は次のようになる。

種類	銅／コンスタンタン	鉄／コンスタンタン	クロメル／コンスタンタン	クロメル／アルメル
常用限度	300°C	600°C	700°C	1000°C
過熱使用限度	350°C	750°C	800°C	1200°C

( J I S C 1602 - 1981 )

- 注) (1) 常用限度とは、空気中において連続使用出来る温度の限度をいう。  
 (2) 過熱使用限度とは、必要上やむを得ない場合に短時間使用出来る温度の限度をいう。  
 (3) 各温度は線径によって異なる。(本表は最大線径の場合を示す)

#### (b) 特徴

- (1) 保護管に適當な材料を選ぶことによって機械的衝撃や振動、摩耗に強い構造とすることができる。  
 (2) 安価である。

### 2.2.2 赤外線輻射式

#### (a) 測定原理

絶体零度以上のあらゆる物質は、温度に対応した強さの赤外線を外部のあらゆる角度に放射している。この赤外線エネルギーは、その物体の絶体温度の4乗に比例するので、この輻射熱を吸収する物体を用いて受熱による温度上昇を測定することによって、放射体の温度を計測できる。

#### (b) 特徴

- (1) 無接触式なので、摩耗せず長寿命である。  
 (2) 精度が高い。  
 (3) 被測定物と輻射型温度計との間に、水蒸気や炭酸ガスが介在すると、これらのガスによって輻射熱の一部が吸収されて誤差を生じる。  
 (4) 石炭庫内の表面温度は測定可能だが、自然発火は表面下、数mで発生するので、早期発見の効果は薄くなる。  
 (5) 値段が高い。

## 2.3 ガス検知計

ガスの測定方式も多数あるが、こゝでは、石炭の場合に発生する一酸化炭素およびメタンガスの測定に適した方式の代表的なものを選び調査した。

### 2.3.1 非分散赤外線式

#### (a) 測定原理

一酸化炭素やメタンのような2つ以上の異なる原子から構成されているガス分子に、赤外線領域の光線をあてると、ガス分子は、その分子構造によってきまる特定波長の光を吸収する。

この吸収スペクトル分子の種類を判別し、また吸収の強弱で、濃度を判定する方式である。

#### (b) 特徴

- (1) 測定対象ガスはCO、CO<sub>2</sub> およびCH<sub>4</sub>等のHC系ガスである。  
 (2) 微量COの場合、感度が落ちる。  
 (3) 測定範囲(最低および最高検知濃度)は0～100%である。  
 (4) 精度が高く応答が早い。  
 (5) 高価である。

### 2.3.2 接触燃焼式

#### (a) 測定原理

可燃性ガスの検知に使用される方式で、白金フィラメントの周囲に白金、パラジウム等の触媒を固定して、これに耐久処理を加えたものを検出素子（検知エレメント、センサともいう）としており、こゝに可燃性ガスを含む空気が接触すると、可燃性ガスの濃度が爆発下限界以下であっても、触媒の作用によって酸化反応を起こし、この時の反応熱で検出素子の温度が上昇して、その抵抗が大きくなることを利用したものである。

#### (b) 特 徴

- (1) 爆発下限界までは、ガス濃度に対して出力が直線的に変化する。
- (2) 温度変化に対して安定性が高い。
- (3) 測定精度が高く、安定である。
- (4) 各種の可燃性ガスの爆発下限界濃度の出力がほぼ同じである。
- (5) ハロゲン化合物、硫黄化合物等によって触媒は被毒する。

### 2.3.3 半導体式

#### (a) 測定原理

可燃性ガス、毒性ガス両者の検知が可能で、金属酸化物半導体 ( $\text{SnO}_2$ 、 $\text{ZnO}$  等) へのガスの化学吸着による電気伝導度の変化を利用した方法である。金属酸化物の焼結体である半導体センサを内蔵ヒータにより加熱し (200~400°C)、ガスの吸着、脱離の応答速度を速める。ガスが吸着すると、半導体との間で電子のやり取りをし、電子密度と電子構造が変化し、電気伝導度が増大する。この変化がガス濃度の2乗に比例することを利用した方式である。

#### (b) 特 徴

- (1) 出力特性は対数的である。
- (2) 低濃度で高感度である。低濃度アラームの設定が可能である。
- (3) 出力電圧が大きい。
- (4) 有毒ガスによる被毒に強い。
- (5) 長寿命で長期間安定に作動する。

### 2.3.4 定電位电解式

#### (a) 測定原理

毒性ガス（一酸化炭素等）の検知法で、隔膜を透過して、電解液中に拡散吸収された測定対象ガスを、特定の電位で電解し、その際生じる拡散電流を検出して、ガスの濃度を測定する方式である。

#### (b) 特 徴

- (1) 小型、軽量の検知器。検知アラームが可能である。
- (2) 低濃度ガスを精度良く測定できる。
- (3) 干渉ガスの影響が少ない。

## 2.4 重量計

幾つかの方式があるが、こゝでは陸上の実績が多く、構造が簡単なコンベア式について調査した。

### 2.4.1 コンベア式

#### (a) 測定原理

コンベアで輸送される粉粒体の重量を連続的に測定するもので、ベルトを支えているいくつかのローラ又はコンベア全部を浮かせて、ロードセルまたはストレンゲージで検出し、重量信号に変換し、一方ベルト速度は、速度検出器で検出し、両者を相乗して瞬時荷重を求める方法である。その

他に、テコや電気誘導を利用する方法もある。

(b) 特 徴

- (1) 材料、構造は取替え、点検が容易で、粉じんの堆積が少ないよう考慮されている。
- (2) ロートセルまたはストレンゲージ式はテコ式に比較して、摩耗部分が少なく、メンテナンスが容易である。
- (3) 船の動搖、振動の影響を受けやすいので、充分な対策が必要である。

### 3. 石炭だき船に装備した場合の要求項目

石炭だき船の石炭および石炭灰の監視、計測、操作で要求される項目として、1) 船舶特有の項目、2) 船級協会から要求される装備場所特有の項目、3) 石炭だき船特有の項目に分類される。

#### 3.1 船舶特有の項目

(a) 振動、傾斜、動搖等の影響が少ないとこと

船舶の主要目、用途、航路、適用ルール等によって異なるが、こゝでは代表的なものとして、日本海事協会の鋼船規則集検査要領「船舶の自動制御、遠隔制御に関する検査要領」で、制御および計測装置に対する一般要求項目を引用すると次の通りである。

振 動	1 Hz から 10Hz までは片振幅 1.5 mm 10Hz から 60Hz までは片振幅 $(150/f^2)$ mm (f : 振動数 Hz)
傾 斜	横 15 度 縦 10 度
動 摆	± 2.5 度 周期 10 秒
電源変動	定常時 瞬 時
電 壓 ( 定格値の )	+ 6% - 10% ± 20% 1 秒
周波数 ( 定格値の )	± 5% ± 10% 3 秒
但し、定常時の電圧と周波数の変動は同時に起らないものとする。	

(b) 点検、保守が容易な構造であり、長期にわたって信頼性が維持できること。

これから建造する石炭だき船には、過去のそれとは異なり、石炭、石炭灰の関連装置の運転および制御に大幅な自動化、遠隔化を適用し、機関室の無人化、省力化を計る必要がある。このためには、機器特にセンサの高い信頼性が要求される。

#### 3.2 船級協会から要求される装備場所特有の項目

各船級協会共防じん、防爆に対する規定があり、防じんの対策として、石炭ダストおよびアッシュ、防爆としては、メタンガスおよび粉じんを対象としている。表 2.4.2 に各船級協会の電気機器の防じん、防爆に対する主な要求項目を示す。

##### 3.2.1 危険場所の定義

石炭だき船の場合の危険場所とは、ガスおよびダストの発生する所である。ガスは石炭から放出されるメタンガスで、メタンガス爆発を、ダストは粉じん爆発の発生を防ぐことを目的としている。

NV および AB は危険場所を、(1) ガスおよびダストが発生する所、(2) ダストが発生するが、ガスが発生しない所、(3) ガスのみ発生する所の 3 つに区分し、各場所毎に配置される電気機器の防じんおよび防爆について規定している。石炭庫周辺については(1)、給炭ホッパについては(2)としている。

NKは特に区分けはしていないが、ガスおよびダストの発生する恐れのある場所として、まとめて規定している。

LRは危険場所として、場所毎の規定はしていないが、石炭ダストの堆積する所および石炭庫対策を要求している。

### 3.2.2 防じん、防爆対策

防じんについては、LRがIEC-IP55相当、NKは全閉防じん構造とする様に要求している。

防爆については、NVはガスおよびダスト危険区画は本質安全防爆を、他の区画についてもそれ規定している。NKは石炭庫周辺については、防爆構造および外被表面温度を規定しているが、給炭ホッパ等については、一定の条件を満たせば、防じん構造でも良いとしている。

ABも各々の零封気で使用することを承認されたものとしている。

LRは石炭庫内部に装備する機器について規定している。

以上が、各船級協会の要求の要点であるが、これを計器類について整理すると次の様になろう。

- (1) 石炭、ダスト、アッシュの堆積する場所に極力置かぬこと。
- (2) 止むを得ぬ時はまず防じん構造とし、外被表面温度を低くすること。石炭庫およびその周辺のメタンガスやダストの発生する場所に装備する時は、何らかの防爆構造とする必要がある。特にNVの本質安全防爆の要求が厳しい。計器によっては必ずしも本安の承認が得られぬものもあるので、別途、協会の承認を得る必要があろう。

最近、石炭だき船用としてLRから承認を得た計器の場合は、石炭庫内装備のセンサは特殊防爆、上甲板上の装置は耐圧防爆であった。

## 3.3 石炭だき船特有の項目

石炭だき船に装備する条件として次のことが考えられる。

- (1) 陸上で、石炭、石炭灰での使用実績が充分にあること。
- (2) 石炭庫や給炭ホッパ内に装備するセンサは、ストーカだきボイラに使用する最大40mm前後の塊炭の衝撃でも、摩耗、変形しないこと。
- (3) 石炭庫内の水蒸気およびそれを含んだ炭じんの付着やアッシュホッパ内の高温に充分耐えうる構造であること。

## 4. アンケート調査結果

### 4.1 レベル計

#### 4.1.1 レベル計メーカー

国内のレベル計メーカー12社にアンケートを出し、全社から回答をもらった。内2社は該当機種無しのことなので、残り10社の回答を整理した。

(a) 静電容量式メーカーは6社あり、連続式は2社、ON/OFF式は全社標準品を持っている。陸上の石炭、石炭灰の実績は多数あるが、船用の実績は無い。許容圧力、温度はメーカー間で相違するが、1000°C以上がON/OFF式で2社、400°C以上がON/OFF式で2社ある。連続式の場合、ガイドパイプ内を可動電極がレベルの変化に追従するタイプと、電極自身がパイプ状になっており、TOTALの容量変化を測定するタイプとあるが、前者の場合、ガイドパイプは絶縁材料で、陸上ではFRP等の各種樹脂パイプが使用されているが、耐熱的に約180°Cが限界である。

相対湿度は、各社補正回路を設けることにより問題はない。ただし、前述したように、取付場所が側壁近くに限られるので、測定物の安息角を考慮してアラーム点を決める配慮が必要である。

粉体の割合が多い場合は見掛け比重が小さく、粉体に空気の含有量が多く、比誘電率が小さくなるので、誤差が大きく出たり、見掛け比重のバラツキにより、リニアな特性が得られにくくなる。更に粉体圧の違いにより、石炭庫上部と下部では比誘電率が異なり、同様にリニア特性が得られず、誤差が±15%位生じることがある。

防爆グレードについては、ほとんどのメーカーが本質安全防爆であるが、そうでない場合でも、電極は石炭庫内装備とし、防爆の対象となる増幅器、スイッチ類を危険場所外へ装備すれば良いので、対策は可能である。メーカーによっては安全増防爆のみしか無いので、耐圧防爆を要求された場合は、本方式は使用出来ないと回答している。

- (b) 超音波式は4社が回答しており、実績は、石炭、石炭灰共出ている。装備場所は計測点の直上、石炭庫頂部になるので、積込時の衝撃を避けられるので、石炭庫の内側の計測が可能である。ハッピオーブニングがある時は、その区画内での計測は難かしいので工夫が必要である。

船用としての実績は無いが、既に船用としてLRの承認を得たメーカーもある。測定距離は20~30m迄可能と回答しているメーカーもあるが、微粉炭の割合が大きかったり、庫内の炭じんが多い時は、超音波が吸収されたり、船の振動や石炭同士の接触音等のノイズをひろいやすいので、補正や判別回路が必要となる場合がある。ストーカだきの石炭は、瀝青炭であり、粒度も0~40mmがほぼ均一に分布しているので、炭じんは発生しにくく、航海中の計測、監視が中心なので、問題にならないと考えられる。

防爆グレードについては、メーカーによって差があるが、グレードと測定範囲とは相関があるので、注意が必要である。即ち、センサは電圧が高いほど測定距離は長くなるが、本質安全防爆を適用すると電圧を下げる必要があるので、測定距離を下げざるを得なくなる。1社は、特殊防爆によって距離を下げずに防爆を達成している。

- (c) 重錘サウンディング式については、2社から回答をもらった。内1社の実績は石炭、石炭灰共非常に多い。機械式なので、特に摺動する部材の海水零間気内での耐食性を考慮する必要がある。船の振動や動搖によって生じる誤差も考慮する必要がある。

石炭灰の場合、灰中に重錘が埋没する恐れがあるが、これは重錘の形状をカサ型とし、面積を広くすることによって対策可能である。

防爆についても特に問題は無い。

- (d) 回転翼式は、アンケートを送る時に、メーカーを捜すのに苦労したが、3社から回答があった。石炭の実績は多いが、石炭灰の実績があるのは1社のみであった。石炭灰のような微粉の場合は、翼が灰中に埋没しても回転してしまうケースがあるので、プロペラ径を大きくしたり、トルクを適当な値とする必要がある。下限に装備する時は、衝撃を避ける対策をする工夫が必要である。回転軸部のシールも石炭灰や石炭粉が入らぬような対策をすると共に、4~5ヶ月毎の定期検査が必要である。外国の運炭装置メーカーで英國、米国等で多くの実績を持っていて空気輸送システム内に繰り込まれているものがあるが、回答がなかった。

以上の外に、特殊な方式として音叉式、ピストン式、特殊レベルスイッチ式等の回答があった。音叉式は塊炭の場合は間にはさまれる恐れがあるので適当でない。外国メーカーで振動子を使用しているものがあるが、形状が自由なので、使用可能と思われるが、今回の調査には入っていない。ピストン式も小型、軽量であるが、装備場所が側壁に限定される。特殊レベルスイッチ式は、石炭庫頂部からブループを吊り下げ、被測定物に引張られたり、引込まれたりした時の圧力の変化により、レベルを検知する方式であるが、塊炭による摩耗、船の振動の影響が大きいので、船用としては問題がある。

#### 4.1.2 造船会社

本SRに参加している造船会社7社について各社の試設計船(13万載貨重量トンバルクキャリアで

ストーカだきボイラ搭載)に関するアンケート調査を行なった。

- (a) 石炭庫のレベル計測は船級協会の要求が無いので、1社は標準装備していない。標準装備している6社の内、2社がON/OFF式である。
- 連続式は超音波式、ON/OFF式は静電容量および回転翼式である。測定点数は2点が多いが、1社は1タンク当たり24点装備している。回転翼式は高位1点のみ計測している。
- (b) 給炭ホッパは全社LRを適用しているので、何らかのレベル検知器を装備している。ON/OFF式が連続式よりも多い。方式は回転翼式が多く、低レベルの検知も計画している。この理由としては、空気輸送メーカーの標準およびその実績が多いことによると推察される。
- (c) クリンカホッパ、フライアッシュホッパは、NV、NKが高位アラームを要求しているだけで、他の船級協会は要求していないが、全社ON/OFF式を装備している。方式は回転翼式がほとんどで、その他に静電容量式、振動子式が使われている。灰移送装置メーカーの標準に従っているのが2社ある。静電容量式採用の理由は、耐熱性、感度調整可、衝撃対策容易をあげている。
- (d) クリンカ貯蔵タンク、フライアッシュ貯蔵タンクは各々5社、4社が装備している。内2社は両タンクを1タンクで兼用している。どちらにも装備しない会社が1社ある。方式は回転翼式が多く、静電容量式、振動子式も各1社が採用している。回転翼式が多いのは灰移送装置メーカーの実績が多いからである。

#### 4.1.3 ストーカだきボイラユーザ

陸上のストーカだきボイラユーザ6社(製紙会社5社、地域暖房用熱供給会社1社)にアンケートを依頼したが、1社は重油だきへ転換済み、2社は無回答で、回答のあったのは3社(製紙会社2社、熱供給会社1社)であった。その内2社はスプレッダストーカボイラ、残り1社は移床ストーカボイラを装備している。2社は、石炭庫および給炭ホッパに自社製の懸垂板式高位レベルセンサを装備している。安価にもかかわらず構造が単純なのでこわれにくく、完全機械式なので、作動が確実であるとのことである。残る1社はSRのメンバで見学した北海道熱供給公社で、給炭ホッパ、クリンカ貯蔵タンクに回転翼式レベル計を装備している。特に給炭ホッパには4点(Low-Low, Low, High, High-High)装備している。担当者の話によると、既に約6年間使用しているが、本体に関するトラブルは発生していないとのことであった。

## 4.2 温度計

### 4.2.1 温度計メーカー

国内の温度計メーカー6社にアンケートを依頼した所、内5社から回答をもらった。メーカー選定にあたっては、無接触で、石炭庫上部から温度計測可能な赤外線式のメーカーを加えた。アンケートの回答は、赤外線式が3社、熱電対式が2社であった。方式が2種類に片寄ってしまったが、温度計の場合、ある程度方式が限定されるので、止むを得ないと考えている。

- (a) 赤外線式の場合、石炭の実績が少なく、1件だけ石炭ヤードでの実験用に使用した例があるのみである。石炭灰用の実績は無い。船級協会は、石炭庫内の多点温度計測を要求しているが、側壁近くの温度は、側壁からサポートをとれるので、比較的計測し易いが、より内側は、石炭庫頂部に本方式を設けることにより、計測可能と考えていたが、現状では防爆がなされていないので、石炭庫内に装備するのは難しい。あるメーカーは、側壁に耐衝撃性の強いガラスを取り付け、ガラスを通して計測することを考えているが、ガラスの摩耗、キズ、汚れに対する対策が必要である。更に本方式は表面温度の計測用であって、船級協会要求の「深さの異なる点」を測るには、他の方式の計測器が別に必要となる。表面温度だけでは、自然発火の直接の検知も困難である。

- (b) 熱電対式の回答は2社のみであるが、両メーカー共、石炭用としての検討をかなり以前から行なっ

ており、陸上での実績もある。方式としては、シース型熱電対又はケーブル型熱電対による多点計測と、単独のシース型熱電対を多数側壁から差し込んで計測するものがある。

シース型熱電対は、ステンレス管の内部に多数の熱電対をはめ込み、石炭庫頂部から庫内へ管を垂直に取り付け、温度を管壁を通して計測する。この場合、管の厚さを増すことにより、時間遅れが大きくなるが、強度を増すことは可能なので、側壁から離れた内側に装備可能である。石炭の積込みや扱出しの妨げにならぬ様、適当な位置に配置する必要がある。側壁から差し込む方法は、陸上でも一般に使用されている方法で、1社では、耐摩耗型本質安全防爆の熱電対と組み合わせた多点温度監視装置の実績を多数持っている。長さが最高 1.5 m 程度なので、適当な位置に配置することにより、自然発火を早期に検知することは可能である。

#### 4.2.2 造船会社

- (a) 石炭庫の温度計測は、船級協会から要求されているので、1社が測温管のみとしている以外は全て装備している。方式としては、熱電対式、測温抵抗体式各々 3 社ずつである。熱電対式の場合、ケーブル式を採用し、庫内中央付近の計測可能としている会社が 1 社ある。
- (b) 給炭ホッパの場合も石炭庫と同一方式であるが、容量が小さいので点数は少ない。
- (c) クリンカホッパは 5 社が装備しており、方式は測温抵抗体が 2 社、熱電対が 2 社、残り 1 社は未定である。
- (d) フライアッシュホッパは 2 社が装備しており、各々熱電対、液体膨張式を採用している。
- (e) クリンカ貯蔵タンクは 2 社が熱電対式を頂部空間に、1 社が抵抗式を側壁に装備している。
- (f) フライアッシュ貯蔵タンクは、2 社がクリンカ貯蔵タンクと兼用しているので、1 社のみ装備している。アッシュについては装備しない会社が多く、クリンカよりもフライアッシュの方がより少ない。

#### 4.2.3 ストーカだきボイラユーザ

全社、何も装備していない。これは石炭庫の容量が少なく、石炭が常時移動しているので、庫内温度が比較的高い場合でも自然発火の恐れはないとのことである。

### 4.3 ガス検知計

#### 4.3.1 ガス検知計メーカー

国内の主要メーカー 3 社にアンケートを出し、全社から回答をもらった。測定対象は、自然発火早期検知用として一酸化炭素濃度の急激な上昇、ガス爆発防止のため石炭から発生するメタンガスである。測定濃度は、一酸化炭素の上昇濃度域の 5 ~ 15 ppm、メタンガスは爆発下限界濃度 (LEL - 約 5 Vol %) を考えればよい。

- (a) 赤外線式は、一酸化炭素、メタンガスその他のガスを別々に測定可能である。測定範囲は各社バラバラであるが、測定濃度、測定精度からみて、0 ~ 50 ppm 程度は必要であり、それ以上広いと感度が低下して精度が落ちるので、適当ではない。  
メタンガスの 0 ~ LEL は可能である。
- (b) 接触燃焼式も一酸化炭素、メタンガスの測定は可能であるが、個々の検知は不可能で、上記ガス以外の可燃性ガスを含めた合計濃度が指示される。一酸化炭素のみの場合は、測定範囲が非常に広いので不適当である。船用のガス検知の実績が多く、防爆グレードも耐圧防爆が可能であり、価格も安い。
- (c) 定電位電解式は一酸化炭素のみ計測可能で、測定範囲が 0 ~ 50 ppm 可能なので、自然発火検知用として最適である。電解液の交換を約 6 ヶ月毎に行なう必要があるのが難点である。
- (d) 半導体式は一酸化炭素、メタンガスの他に水蒸気や、その他のガスも同時に検知してしまい、ガ

ス毎の濃度分析が出来ないこと、精度が悪いことが欠点である。価格的には一番安い。

なお、各メーカの推奨する方法は次の通りである。

	一酸化炭素(CO)	メタンガス(CH <sub>4</sub> )
A 社	硫化触媒(*)	接触燃焼
	赤外線	赤外線
	定電位電解	半導体
B 社	定電位電解 (赤外線)	接触燃焼
C 社	赤外線	接触燃焼

(\*) 一酸化炭素の測定範囲は0～150ppm、価格は高いが、定電位よりも寿命が長く、保守作業が軽減される(A社のみ製作中)。

防じん対策として、各社共、吸引型の使用を推奨している。

#### 4.3.2 造船会社

LRが一酸化炭素の検知を要求しているので、4社が何らかの計器を装備することにしている。方式は接触燃焼、赤外線式を採用している。計測ガスは船級協会要求通り、一酸化炭素のみ検知している会社が1社あるが、他に可燃性ガス一般という会社もある。

計測場所は石炭庫、給炭ホッパが多く、3社は原則として設けないが、最終的には石炭性状や運炭装置のあり方をみて決めたいとしている。

#### 4.3.3 ストーカだきボイラユーザ

3社共装備していない。常時、石炭が移動しており、石炭庫上部は換気がよいで、特に問題は発生していないとのことである。

### 4.4 重量計

#### 4.4.1 重量計メーカー

4社にアンケートを依頼し、全社から回答を入手した。4社の内1社は米国の専門メーカーである。コンベア式の実績は陸上では多数あるが、船用の場合、船のピッティング、ローリングの影響があるので注意を要する。メーカーによつては、4～5%位精度が落ちると推定している所もある。他方、既に船上のホッパスケールとしての実績があり、それらの問題は解決可能であるといつてゐるメーカーもある。防爆グレードは本質安全、耐圧防爆可能なので問題は無い。

#### 4.4.2 造船会社

7社の内、1社が装備することにしており、1社は船用として適當なものがあれば装備したい。3社は適當なものが無いので装備しないと回答している。他の1社は装備しないが、装備する場合は、精度が高い重量式にするといつてゐる。装備場所は給炭機前である。

#### 4.4.3 ストーカだきボイラユーザ

3社の内2社が、石炭庫と給炭ホッパ間に装備しており、計器型式はベルトスケールである。両社共、5年以上使用しているが問題は無く、信頼しているとのことである。

なお、アンケート調査とりまとめ結果の原紙は、資料2.4.1「石炭関連システムの監視・計測・操作ア

ンケート調査結果」として、(社)日本造船研究協会事務局が保管している。

## 5. 調査結果の考察

### 5.1 レベル計

陸上での石炭および石炭灰の実績は、各方式共多数あり、船用としても使用可能である。特に、回転翼式、静電容量式はON/OFF式で、側壁に取り付け、高位、低位アラームや移送装置の発停用として使用出来る。石炭庫下部に取り付ける時は、石炭積込み時、直接石炭が当たるのを防ぐ為、カバーを設けたり、当たらない場所に取り付ける必要がある。回転翼式をフライアッシュに使用する場合は、翼が灰中に埋没しても、回転してしまうことがあるので、プロペラ径を大きくしたり、トルクを適当な値に調節する必要がある。回転軸部に石炭粉や石炭灰が入らぬよう充分にシールし、4～5ヶ月毎に定検する必要がある。

連続式としては、静電容量式、重錘サウンディング式および超音波式が使用出来る。静電容量式のガイドパイプは衝撃に強く、更に石炭灰に使用する時は、高温に耐える材料を選択する必要がある。重錘サウンディング式は、船の動搖や振動の影響を受けやすく、フライアッシュの場合は、重錘が灰中に埋没があるので、重錘の形状等に対策が必要である。超音波式は高価であるが、無接触式なので摩耗が無く、面倒な保守が不要であり、庫内頂部に取り付けるので、積込時に直接衝撃を受けることが避けられる。

造船会社の計画では、石炭庫は連続式が多く、方式としては超音波式、静電容量式を採用しており、給炭ホッパ、石炭灰ホッパ、石炭灰貯蔵タンクはON/OFF式が多く、回転翼式および静電容量式を考えている。今回、アンケート調査や実地調査したボイラユーザは、古い装置を使用している所が多く、常時、監視を考えているので、保守はかかるが、作動が確実な機械式が多い。

以上の様に各方式共、採用可能であるが、一長一短があり、船用特有の要求を満たすためには、装備場所の選定、保守点検の容易性、信頼性の向上等の検討が特に重要である。例えば石炭庫で、中央部にハッチオープニングがある時は、中央部にセンサを取り付けられないので、石炭庫の形状やセンサの取り付け位置を考慮する必要がある。造船会社の中には、20個以上のセンサを装備する計画もあるが、充分な検討が必要である。

### 5.2 溫度計

今回のメーカーへのアンケート調査は、赤外線式と熱電対式について行なったが、前者の場合実績が少なく、防爆型が無いので、現状では採用は難しい。又、本方式では、表面温度しか計測出来ないため、船級協会要求の「深さの異なる点」を満足させるには、更に別の方式が必要となる。熱電対式の場合は陸上での実績もあり、側壁から差し込む方式や、パイプ内部に熱電対をはめ込み、頂部から庫内へ垂直に取り付ける方式によって多点計測も可能である。造船会社も、熱電対方式や測温抵抗体方式の採用が多い。レベル計と同様に、庫内中央部の温度計測が難しいので検討が必要である。今回調査したボイラユーザの場合、石炭庫の容量が小さく、常時、動いているので、装備していない。

### 5.3 ガス検知計

各方式共特徴があるが、メーカー推奨では、一酸化炭素は赤外線および定電位電解式、メタンガスは接触燃焼式が多い。特に一酸化炭素の場合、低濃度域の測定が要求されるが、赤外線式の場合、各メーカー共、余り低濃度(0～50 ppm)になると精度が落ちてくるので、定電位電解式が適当となるが、電解液の交換があるので多少面倒である。

造船会社は、一部の船級協会が一酸化炭素の検知を要求しているので、接触燃焼式又は赤外線式を回

答している会社があるが、前者の場合、一酸化炭素のみの計測は不可能で、不燃性ガス全般を計測するので、注意が必要である。

#### 5.4 重量計

今回調査したボイラユーザは全て、ベルト式重量計を装備しており、使用実績も長く信頼性も高いとのことであった。石炭だき船の場合、海上運転での燃費計測の必要性があるので、是非装備したいのであるが、船用として適當なものが無いので装備を止めている造船会社が多い。現在建造中の石炭だき船でも一応客先の要求が強いので装備しているが、定常状態に計測し、計測値も参考値で、保証値としない等の条件付とのことであり、今後、適當な方式開発が望まれる。

#### まとめ

今回の調査は、計測器メーカ、造船会社、ボイラユーザと広範囲にわたって、アンケートおよび実地見学することが出来たので、現在の石炭と石炭灰の各対象項目の計測方式とその技術レベルを明確にすることが出来た。調査を始める時点では、既に陸上用として実績があるので、船用としては、船特有の問題のみを調査すれば良いと考えていたが、実際は、陸上用でも今迄は余り自動化、省人化は計られておらず、最近の大容量石炭燃焼ボイラの増加に伴なって、石炭、石炭灰用の計測、制御機器の需要が出てきたものが多いことがわかった。

今回の調査によって、これから石炭だき船に装備可能な方式が幾つかにしほられ、種々の問題点も明らかになったので、計測器メーカと協力して、それらの改善と、同時に新しい技術の開発を進め、最適な監視・計測・操作システムを確立する必要がある。

引用文献 メーカ各社のカタログおよび技術資料

参考文献 久保他：粉体（理論と応用）、丸善

小田：石炭の安全取扱技術、石炭利用技術研究発表会講演集（第3回）1980.9

工業技術院公害資源研究所、熱管理技術講義編集委員会編：熱管理技術講義、丸善

表 2.4.1 監視、計測、操作に関する船級協会要求項目

船級協会	L R	N V	A B	N K
規則名稱	GUIDANCE NOTES FOR THE BURNING OF COAL IN SHIPS BOILERS(1980)	ARRANGEMENTS FOR COAL FIRED BOILERS TENTATIVE RULES	GUIDE FOR SUIPS BURNING COAL (1980)	石炭焼き船の設備に関する検査要領 (昭和 56 年)
レベル 石炭庫 給炭ホッパ	高／低アラーム な し	高／低アラーム 移送自動停止 な し	低アラーム 移送自動停止 な し	高／低アラーム 高アラーム(コレクタホッパ) 条件の異なる 2 處所以上において温度を計測し得る固定の温度計測装置を設けること。
温度 石炭庫 灰塵 灰處理装置	石炭庫の異なる深さでの (AT VARIOUS DEPTHS) 温度をモニターする装置を設けること。 な し	石炭庫の深さおよび位置の異なる所 (VARIOUS DEPTHS AND POSITIONS) の温度計測可能な装置を設けること。 な し	装置内の灰の温度が所定の温度を超えた場合にアラームを発する。 な し	特に規定はしていないが、石炭庫の(メタン)ガス検知装置に関する記述がある。
ガス 重量	ボイラへの給炭管 一酸化炭素検知アラーム (粉碎および移送ブランケット内) ボイラ供給量	高アラーム な し な し	高アラーム な し	な し

表2.4.2 電気機器の防じん、防爆に対する船級協会の主要な要求項目

危険場所	L R	N V	A B	N K
特に規定はないが、石炭ダクトの堆積する所および石炭庫に対する対策を要求している。	(1) ガス及びダスト危険区分 • 石炭庫区分 • 石炭庫トップ開口を有する閉鎖又は半閉鎖場所 • 石炭庫、ホッパ、微粉炭設備及び粉砕機の通風ダクト (2) ダスト危険（ダストコントロールが無い場合）区分 • ホッパ及び石炭がダンプする他の区分 • 機械式コンベアダクト内部 • 石炭準備室 (3) ガス危険区分 • ガス及びダスト危険ベース（通風出口も含む）への開口部及び石炭ヘンドリンク装置通風ダクト出口から3m以内の暴露甲板上の区域及び半閉鎖場所	Category A : (石炭ダスト及びメタン) • 石炭庫及ぼ準備装置の通風ダクト • 通風ダクトから3m以内の区域 Category B : (石炭ダスト) • 石炭が落ちる区域 • 石炭が落ちる移送点から3m以内の開口部 • コンベア内部 Category C : (火災や爆発の危険はないがダストの堆積する所) • 開放剤コンベアの区域	石炭から発生するガス及びダストによる爆発性混合気を生じる恐れのある場所として下記を規定している。 (1) 石炭庫 (2) 石炭庫に直接開口（ハッチ等）を有する石炭庫直上の閉鎖又は半閉鎖場所 (3) 石炭庫の通風ダクト内部 (4) (1), (2)の区域の大気開口部又は(3)の通風ダクトの大気開口部の周囲3m以内の暴露甲板上区域及び半閉鎖場所 (5) 給炭ホッパ及びこれと類似の貯蔵設備の内部 (6) 石炭の移送及び粉碎設備並びに給炭設備を収容する管、トンネル又はケーシング内部 (7) (5)及び(6)の設備と設ける通気ダクトの大気開口部の周囲3m以内の暴露甲板上の区域及び半閉鎖場所	石炭から発生するガス及びダストによる爆発性混合気を生じる恐れのある場所として下記を規定している。 (1) 石炭庫 (2) 石炭庫に直接開口（ハッチ等）を有する石炭庫直上の閉鎖又は半閉鎖場所 A) 危険場所((1)から(4)及び(7)) • ダストアッシュ等が堆積する恐れのある場所で使用するものは、全閉防爆構造とし、外表面の温度上昇に對して特に規制したものであること。 B) 上記以外の機器 • NKが適当と認める防爆構造のものであつてその外被表面温度が次の値を超えないこと。 a) 過負荷となる恐れがある機器 120°C 上記以外の機器 165°C • 電線は Armored 及び M1 タイプとする (Cat.A ~ C)。 B) (5)及び(6)の場合は、次の条件に適合する場合には防爆構造としなくてもよい。 (a) ダストが機器内部に侵入しないこと。 (b) ダストが機器表面になるべく堆積しないものであること。
電気機器に要求される項目	石炭ダストが堆積しない場所に装備のこと。不可能な時は以下を満足する構造とすること。 (a) ダストが内部に侵入しないこと。IEC Pub. 144 の IP55 は許可される。 (b) 温度の上昇の原因となる良好な冷却を妨げる様なダストの表面での堆積が無いこと。 (c) 外被表面温度はダストの着火の発生が不可能な値とし、過負荷の恐れがない機器は 165°C、それ以外は 120°C とすること。 石炭庫内部に置かれる機器は IEC Pub. 79 の Group II B および Class T1 又は同等の国家標準で承認されたものであること。 スイッチや保護装置は石炭庫ベース外に配置すること。	爆発性空気で使用される装置は IEC Group I の様な防爆用として製作及びテストされなければならない。 各区分で通常認められる機器のタイプは以下の通りであるが、爆発に対する安全性が保持されれば他の機器も認めることができる。 (1) ガス及びダスト危険区分 • 本質安全防爆 (2) ダスト危険区分 • 本質安全防爆 • 内圧防爆 • 安全増防爆 • 静圧防爆 • Cable, Socket-outlets に関する規定あり。	Category A : 石炭ダスト及びメタンの暴露気内で使用することが承認されたもの。 Category B : 石炭ダストの暴露気内で使用が承認されたもの。 Category C : ウォータタイトで下記温度を超えない構造のこと。 • 過負荷となる恐れがある機器 120°C 上記以外の機器 165°C • 電線は Armored 及び M1 タイプとする (Cat.A ~ C)。	ダストアッシュ等が堆積する恐れのある場所で使用するものは、全閉防爆構造とし、外表面の温度上昇に對して特に規制したものであること。 A) 危険場所((1)から(4)及び(7)) • NKが適当と認める防爆構造のものであつてその外被表面温度が次の値を超えないこと。 a) 過負荷となる恐れがある機器 120°C 上記以外の機器 165°C B) (5)及び(6)の場合は、次の条件に適合する場合には防爆構造としなくてもよい。 (a) ダストが機器内部に侵入しないこと。 (b) ダストが機器表面になるべく堆積しないものであること。

## 第3編 公害防止のための調査

### 第1章 港湾規則・基準

#### まえがき

近年、海洋汚染、大気汚染に対する関心が一段と高まり、環境保護の必要が世界的に強く主張されるようになった。このような情勢の下で石炭だき船の建造を進めようとする場合、運航中船内で発生する石炭灰、ばい煙の処理について、十分考慮する必要がある。

諸外国および日本においてこれら廃棄物、ばい煙に対しどのような法規制があるか、又、今後の動向はどうなっているかを調査し、以下にとりまとめた。

#### 1. 外地主要積卸港、石炭専用船の主要就航水域における規制

##### 1. 1 はじめに

1980、WOCOL掲載の「2000年における石炭供給国選択の想定図」(図3.1.1)から20年後の石炭貿易の流れを想定した。(図3.1.2)これをもとに石炭主要積卸港31港を選定し、石炭灰による環境汚染に関する規則・基準につき現在の規制並びに将来の動向を船社の代理店を通じ問い合わせた。

この結果17港より回答(図3.1.3)があったので表3.1.1にその要点をとりまとめた。

##### 1. 2 外地主要港における規制の概要

- (1) 石炭だき船を対象とした特定の規則、基準は各港ともなかった。
- (2) 現在及び近い将来石炭だき船が就航する場合、新たに規則、基準を制定する必要があると回答した港が17港中4港(シドニー、バルセロナ、バンクーバー、オス)あった。
- (3) 西独法制局の「MARPOL 73/78以上の規制は考えていない」との情報は注目に値する。
- (4) 新たに特定の規則、基準が作られるまでは、現行の一般的環境基準が準用される。

先進国で規定している一般的環境基準を総体的にとりまとめると次の通りである。

###### a 海洋汚染について

- ・領海内での石炭がらの投棄禁止
- ・港域内での石炭がら、石炭灰の投棄禁止

###### b 大気汚染について

- ・港域内における黒煙の一定量(リングルマン<sup>\*</sup> 1以上の濃度が1時間に3分間)以上の排出禁止。

- ・ストップローの禁止

(\*リングルマンについては、資料3.1.1参照)

##### 1. 3 主要港における規制例

###### (1) 海洋汚染防止について

HONG KONGにおける“The Dumping at Sea Act 1974”(資料3.1.2.)

###### (2) 大気汚染防止について

豪州N. S. W州の“The Maritime Services Act 1935”にもとづく“Port Authority - Smoke Control Regulation N. S. W”(資料3.1.3)

## 2 日本における法規制

### 2. 1 規制の概要

- (1) 石炭だき船を対象としたルールはない。
- (2) 石炭がら、石炭灰の海中投棄による海洋汚染防止／炭じん、ばい煙による大気汚染防止の二面から規制される。

### 2. 2 関連法規及び規制内容

- (1) 「港則法」による港域内外の海中投棄禁止の規制がある。
- (2) 「海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律」による海洋投棄禁止の規制がある。
- (3) 「大気汚染防止法」及び「都道府県条例」による港内の大気汚染に関する規制がある。
- (4) 規制内容は表 3. 1. 2、図 3. 1. 4.Ⅳにまとめた。

## 3 国際法における規制

### 3. 1 規制の概要

- (1) 石炭だき船を対象としたルールはない。
- (2) 炭じん、ばい煙等大気汚染に対する規制はなく、海洋投棄による汚染防止の規制がある。

### 3. 2 現行条約による規制及び今後発効が予想される条約の規制内容

- (1) 「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」(Dumping 条約)があり、海中投棄に対しては締約国の許可が必要と規定している。
- (2) 「船舶からの汚染の防止のための国際条約」(1973年MARPOL)「同条約に関する1978年議定書」(1978年PROTOCOL) 船内発生廃棄物の処分に対し附属書Vで規制している。  
本条約の発効は1983年前半と予想されているものの附属書Vは選択批准となっており、現状ではこれより若干発効が遅れる予定である。
- (3) 「第三次国連海洋法会議の非公式統合交渉草案」の中で第XII部「海洋環境の保護及び保全」として規定がある。1981年に草案がほぼまとまったが一部の解釈をめぐり対立が尚残っているため、採択及び内容変更等の見通しについては、今年1982年3月に開催される第3次国連海洋法会議の第11会期において採択されることが期待されているものゝ、現在なお予測がつかない状況にある。
- (4) 規制内容は表 3. 1. 3 にまとめた。

## まとめ

現状では石炭だき船を対象とした規制基準は定められておらず、一般船舶に準じて規制されることになる。しかし石炭だき船の就航に伴い、別に基準がもうけられる動向にあると言えよう。

大気汚染防止に関しては陸上での規制が強化されつつあり、今後船舶の排煙規制にも波及し、内外地問わず規制が強化されるであろう。又、海洋投棄に対する規制では将来、「MARPOL 73/78」の第V章が発効した場合、特別海域(地中海、紅海等)での石炭灰が排出禁止となり航行上問題が生ずるのではないかと懸念される。

かかる状況下にあって、国内規制、外国諸港の規制ならびに国際法の動向に対して、今後十分注意し、適切な対応をして行く必要がある。

参考文献 「海洋法条約草案（仮訳）」 日本海運振興会  
国際海運問題研究会  
「海洋法の知識」 高梨正夫著 （成山堂書店）  
“ COAL - BRIDGE TO THE FUTURE ” WOCOL  
「石炭の利用拡大の展望」 エネルギー総合推進委員会

表3.1.1 外地主要石炭積卸港等における規制

	石炭だき船特定ルールの有無	海洋汚染 （代理店からの報告による報告）	海 洋 汚 染	火 気 汚 染	参考事項	将来の予測
CHI SWAN G TAO (CHINA)	無	（代理店からの報告による報告）	1. 垣内では油分10ppm以上の汚水及び毒性汚水の排出禁止 2. 港内、錨地では理由なくゴミ、石炭灰等の投棄禁止	1. 港内では30分以上燃煙を出してはならない。 2. 行駛燃氣はタンカーアンドバース付近停泊禁止	1. 廃物投棄の必要ある場合当局の許可を要す。 2. 行駛燃氣はタンカーアンドバース付近停泊禁止	
KAOSIUNG (TAIWAN)	無	「海水汚染管理規則」= 1981.3.23公布 「在港船注意事項」=海港務局	1. 油、油を含む混合物及び廃棄物の港域内投棄禁止	1. リンゲルマン2以下の中性度であること。		
BANGKOK (THAILAND)	無	港務局発表#18/2514 =Measuring Smoke and Decibel Levels on Motor Vessels	内燃圧縮船が、係留中主機を2/3MGOとした場合の排煙が排気筒直上においてPhotocell type measure deviceの測定により40%以上であること。	受光度によって、排煙を測定するもの（東京都衛生局大气保全部による説明）		
HONGKONG	無	Dumping at Sea Act 1974	1. 船舶ではNormal operation下で出る物質以外の屑棄禁止。	1. 無気汚染禁止 #14/1976	港務局は行駛燃氣のAshが船艤のNormal operation下の範囲かどうか検討中	
SINGAPORE	無	Port Regulation #88 =1977年制定	1. 港域内において、灰、砂利、油の投棄禁止、その量、燃度限界は当局の限度による。	1. 港域内における排煙禁止による。		
SYDNEY (AUSTRALIA)	無	海洋汚染：石炭参照 Port Authority — Smoke Control — Regulation N. S. W.	1. 陸岸より200 miles以内でのAshes投棄禁止(Government Law) 2. 港内におけるAsh ejeuctorの使用禁止 (Law of Port Sydney)	1. 港内ではリンゲルマン4以上の排煙禁止。 2. (UL)リンゲルマン3も燃烟の対象 (① 30分間に合計3分間以内 ② 通常の運航下による排煙の場合は許容される。)	左側排煙規制は当局の許可を受けた場合排煙が、日中で指示に従って行なわれる場合燃烟の対象とならない。 New Rule 制定の動きあり	

		使用される(あるいは準用されるとみなされる)汚染防止ルール				参考事項	将来の予測
	石炭たき船特定ルールの有無	ルール出所	海 洋 汚 染	大 気 汚 染			
DURBAN (SOUTH AFRICA)	無	1. 石炭ガラ受入れの船上設備なし 2. 領海内の石炭ガラ投棄禁止					現状Local shipping Co. が2隻の石炭焚船建造のF/S実績中
MALMÖE (SWEDEN)	無	Environment — Protecting Law	1. 全領海での海洋投棄禁止 ( Helsinki Convention )				石炭焚船が米航才より うてなれば石炭灰取能 設備を設ける用意あり。
ROTTERDAM (NETHERLANDS)	無 (ロッテ以外の ダッチポートに も規定なし)			1. 船舶の港内におけるスタート プロセス禁止			MARPOL 73/78の液 化電制燃物のうち OilとLiquid chemi cal以外はoption とする複数
BARCELONA (SPAIN)	無 (スペイン各港 ともない)						ルールを作らべく検 討中
HAMBURG (WEST GERMANY)	無	陸上のルール適用 = BUNDESUM MISSIONSSCHUTZGESETZ (Para 2 Water Pollution (Para 38 Air Pollution	1. 領海内でAsbes を含む燃 物投棄禁止		1. 排煙は出来るだけ規制するこ と。		法制局では MARPOL 73/78以上の規制 は受けない、
DUISBURG (FRANCE)	無	Port Regulation	1. 港内及び隣接海域における燃 物の投棄禁止				
LOS ANGELES (U.S.A.)	無				( 排止燃等 ) NOx... 250 pound/day COx.... 2500 pound/day		
SEATTLE (U.S.A.)	無	US Coast Guard Title 33(区域) Puget Sound Air Pollution Control	距岸 50 海里以内ではいかなるもの も燃棄禁止		1. 1時間以内に 3 分以上リザーブ アシスト以上の排煙禁止		

石炭たき船暫定ルールの有無	港 — 港 出 所	海 洋 汚 染	大 気 汚 染	参考事項	将来の予測
			2. SO <sub>x</sub> 排出基準 1. 0 ppm 5分 連続した8 h以内 0. 4 ppm 60分 1回を超えないこと 3. NO <sub>x</sub> 排出基準 0. 05 ppm 以下		
VANCOUVER (CANADA)	無	Canadian Waterにおいては一部の油類や燃費物の燃費禁止	黒煙の排出禁止	石炭焚船が就航するようになれば当然規制が行われよう。	
CRISTOBAL (PANAMA) =PANAMA CANAL RULE	無	海洋汚染ルール Law 21 = 1980.7.8 制定 CFR. 35 Canal Zone Regulation	1. 細船とその航行水域において、船舶からの汚染物質の排出禁止（この規定はパナマ船籍船が他の国を航行する時にも適用される） 2. 汚染物質を排出するときは、National Port Authorityに連絡のこと。 3. 汚染による船主責任はトン当たり 2,000 フラン合計 210,000,000 を越えないものとする。（Article 19） 4. 300dwt 以上の汚染物質運搬船および 2,000 トン以上のタンカーは ARTICLE 19を構たす保険に加入すること	1. Air pollutionに関する規則なし、又現在規制の動きもない。	

港内における(あるいは使用されるとみなされる)汚染防止ルール		適用される(あるいは使用されるとみなされる)汚染防止ルール				将来の予測	
港名	港内における有無	出 所	海 洋 汚 染	大 気 汚 染	参考事項		
SANTOS ( BRAZIL )	無	San Paulo State Law Regulation NO. 997 = 1976年5月 ( 塗上ルル )	不詳	1. リンケルマントを超える濃度 の排煙禁止、但し次記は免除。 ① 24時間に15分間以内 ② 1時間に3分間以内	他IC Local lawは存在 する。		
FOS ( FRANCE )	無	Port Regulation	1. 港内及びその隣接 海域では、ゴミや固形物の投棄 の禁止。 2. 廉油やスマラッジは陸上施設で排 げること。	1. 港内や港口での黒煙の排出 禁止。	石炭焚船が就航すれば、往時の規則が見 直されよう。 現在のところ正規 の規則なし。		
SUEZ CANAL	無	Rules of Navigation Suez Canal Authority	1. 港内及び運河内における石炭灰 等の排出禁止。	質問状に対する回答が なかったので念の為、 Rule of Navigation から抜粋した。			

表3.1.2 環境汚染を規制する法律(日本)

対象物	処分方法	関連する法律	内容	条文
廃棄物 (石炭がら、石炭灰)	海洋投棄処分	港則法	1) 港域内及び港界外1万メートル投棄禁止 2) 石炭積込み時、水面への脱落を防止する措置をとらねばならない。	法第24条
海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律			1) 船舶からの処分は2)～4)を満足すれば可能 2) 輸送活動、漁ろう活動その他の船舶の通常の活動に伴い生ずる廃棄物のうち熱しやく減量15%以下の状態にしたもの及び無機性のもの。 3) 排水海域はC海域(すべての国領海の基線から50海里を超える海域(図3.1.1参照)) 4) 排水方法は比重1.2以上の状態にして排出する事、粉末のまままで排出しない事	法第10条第2項第3号 施行令第6条第1号
炭塵、煤煙	大気放出処分法		1) 工場及び事業場で発生し、大気中に放出される煤煙は許容限度内で放出可能 2) 都道府県は排水基準を定める事ができる。 3) いおう酸化物、ばいじん、有害物質に分類、各排水基準あり。	法第3条 法第4条 施行規則第3条、4条、5条
		各都道府県条例の1例 (神奈川県公害防止条例)	1) 船舶から許容限度以上の煤煙を大気中に排出禁止。 2) 対象は横浜港、川崎港とする。 3) リンケルマン濃度1度を許容限度とする。 4) 総トン数3,000トン未満の船舶は除く。	条例第15条 施行規則第13条第1、2項

表3.1.3 環境汚染に関する規制（国際法）

対象物	処分方法	関連する条約	動向	内容	条文
石炭がら 石炭灰	海中投棄	廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約（ダンピング条約）	1972年採択 1975年発効 1979年改正	(1) 締約国の許可があれば投棄可能 (2) 許可する基準には物の特性及び組成、投棄場所の特性及び投棄の方法、海洋に及ぼす影響等を考慮する事 (3) 条文で特に基準を決めていない	条約第4条 附録書Ⅲ (但し、処理船が収集して処理する場合)
		1973年の船舶からの汚染の防止のための国際条約（MARPOL）	1973年採択 未発効	(1) 船舶からの排出は次の条件で可能 (条件) 粉碎すれば3海里～12海里で排出可能 12海里以遠では排出可能 (2) 特別海域（地中海、黒海、紅海、ペルシヤ湾）では排出禁止	附録書V (附録書Vの批准は各國の選択)
		1978年MARPOL議定書	1978年採択 未発効	(3) すべての船舶対象 (4) 構造、設備等の基準は特に定めがない。	
船舶からの汚染	海中投棄 大気放出	国連第3次海洋法会議 非公式統合交渉草案	審議継続中	(1) 船舶からの投棄、大気排出等による海洋環境の汚染防止のため団体ばかりではなく沿岸国、入港国等、世界中の国が監視、検査、処罰に協力することを規定。 (2) 船舶は領海ばかりでなく、他国の経済水域でも国際規則や沿岸国の法令に反して排出を行ってはならず、違反した場合は沿岸国、入港国での検査拿捕が行われ、かつ罰則が課せられる。 (3) 具体的に排出基準は規定しておらず各國で特定すべき事としている。	第XIII部 第193条～第238条

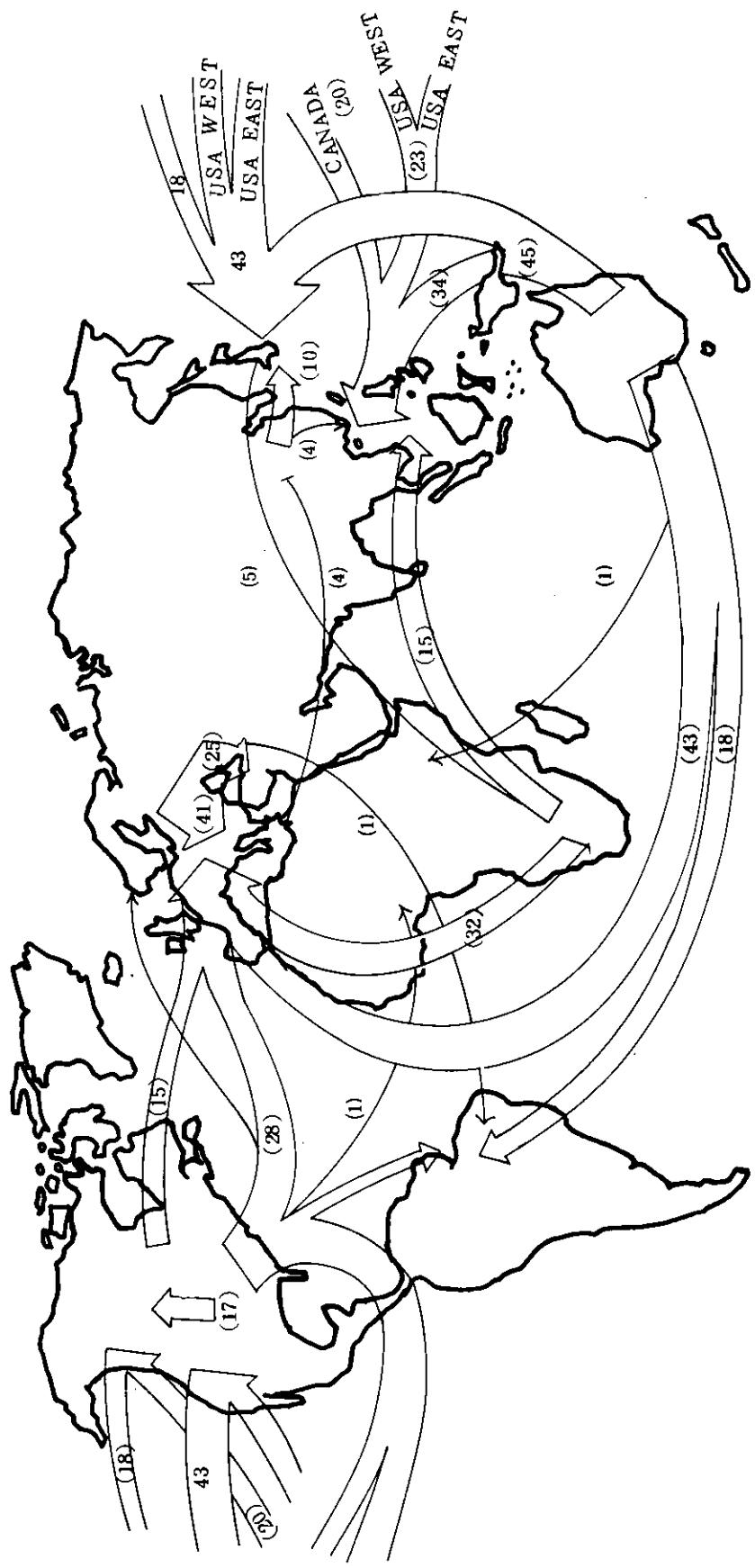


図 3.1.1. COAL TRADE 2,000 年

1980 WOCOL “2,000 年での石炭供給国選択の想定図”の CASE A から（数字単位、石炭換算、100 万トン）

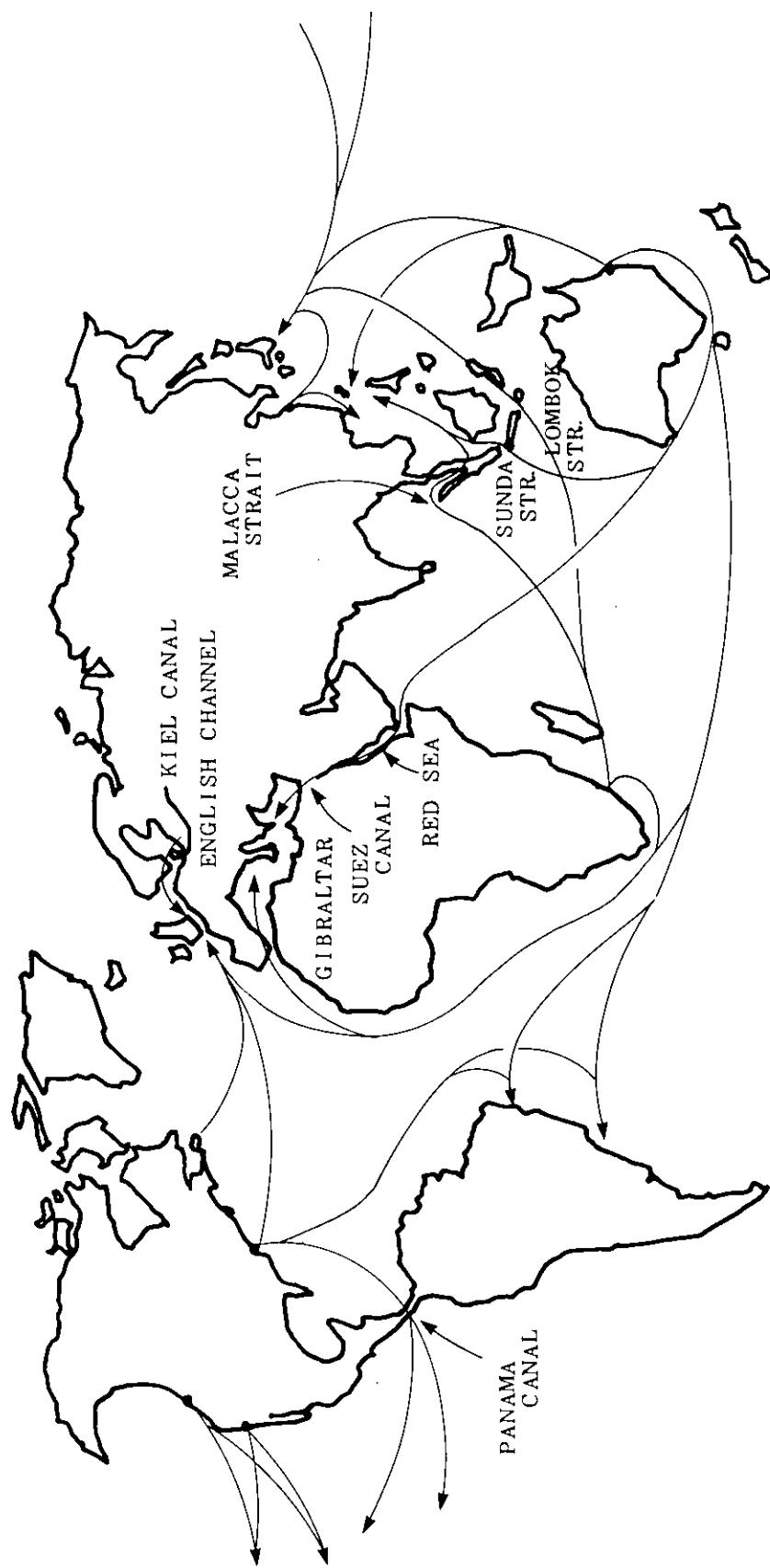


图 3.1.2. ESTIMATED SEA LANES OF COAL TRADE IN FUTURE

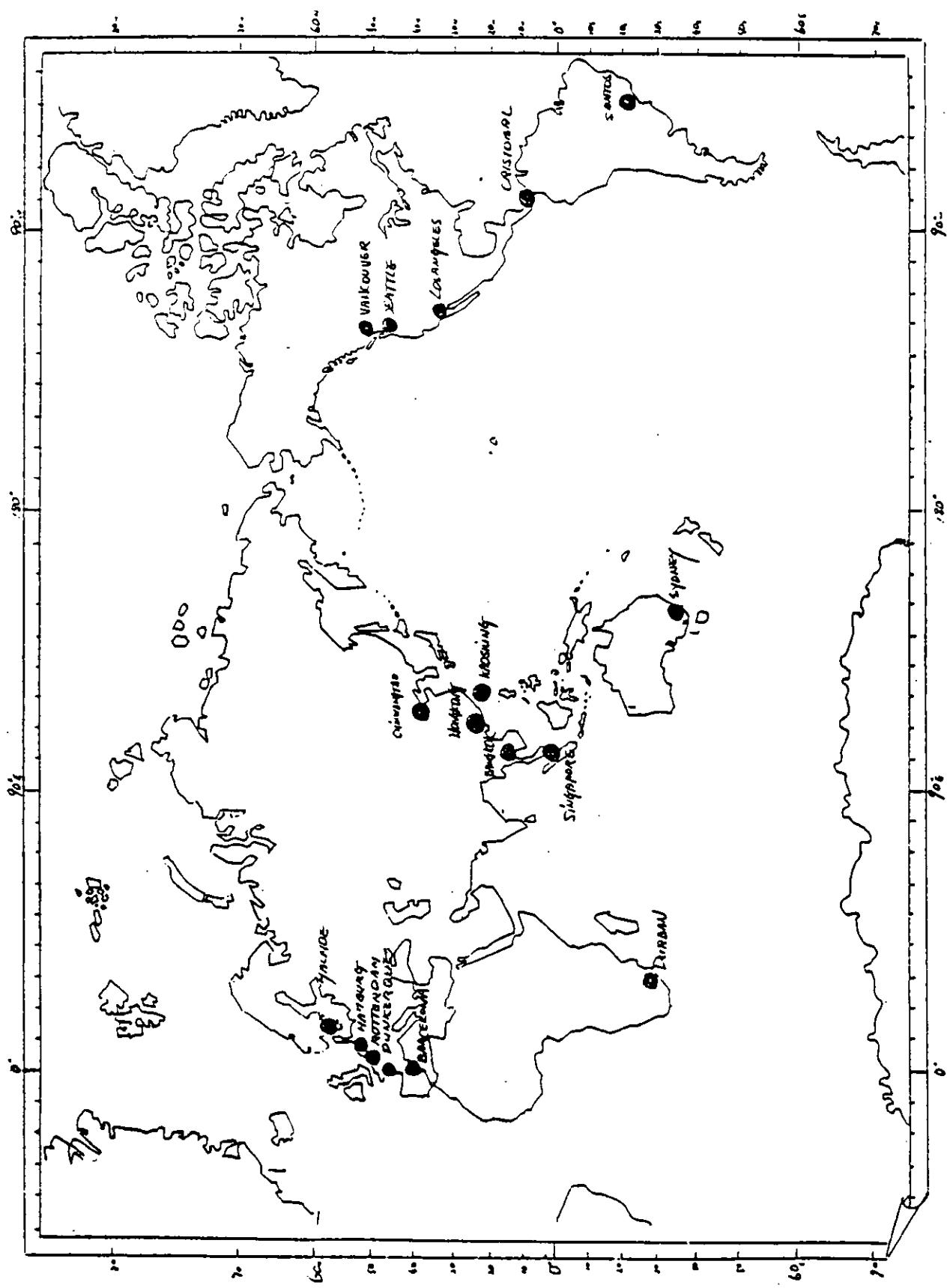


圖 3.1.3. 外地調查實施港

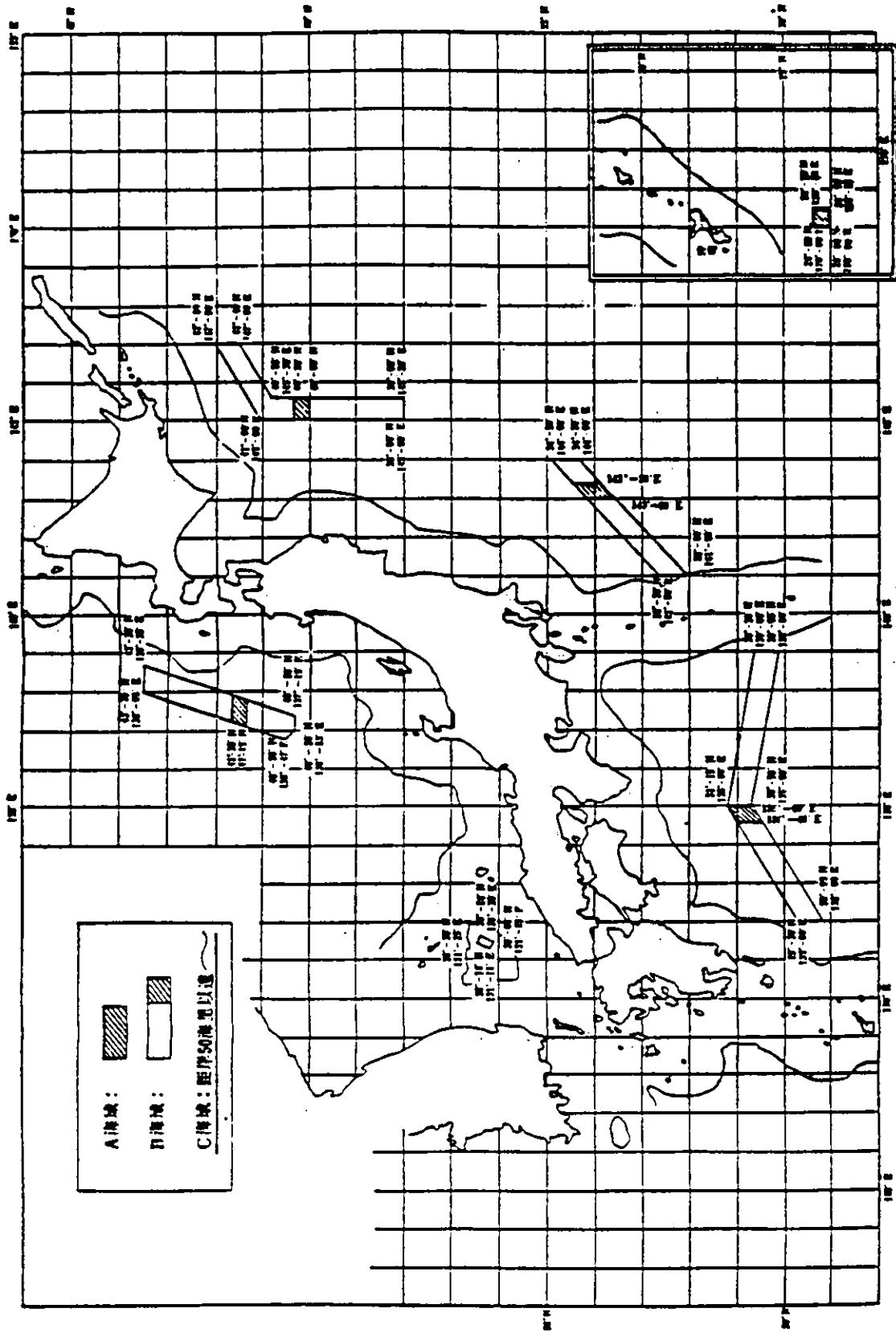


図 3.1.4. “海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律による廢棄物排出海域図”

資料 3.1.1.

L. S. NO. 1 TO GAZETTE NO. 14/1976 LN. 100/76

The following order is published for general information:—

LN. 100 of 1976

1975 No. 1831

DUMPING AT SEA

THE DUMPING AT SEA ACT 1974 (OVERSEAS TERRITORIES)  
ORDER 1975

Made - - - - - 12th November 1975

Laid before Parliament - - 19th November 1975

Coming into Operation - - 10th December 1975

At the Court at Buckingham Palace, the 12th day of November 1975

Present,

The Queen's Most Excellent Majesty in Council

Her Majesty, in exercise of the powers conferred on Her by section 15(3) of the Dumping at Sea Act 1974(a), by the Foreign Jurisdiction Act 1890(b) and all other powers enabling Her in that behalf, is pleased, by and with the advice of Her Privy Council, to order, and it is hereby ordered, as follows:—

1. This Order may be cited as the Dumping at Sea Act 1974 (Overseas Territories) Order 1975 and shall come into effect on the 10th day of December 1975.

2. The Interpretation Act 1854(c) shall apply for the purpose of interpreting this Order and otherwise in relation thereto as it applies for the purpose of interpreting, and in relation to, Acts of Parliament.

3. (1) The provisions of the Dumping at Sea Act 1974, modified and adapted as in Schedule 1 hereto, shall extend to the Territories specified in column 1 of Schedule 2 hereto.

(2) For the purpose of construing the said Act as so extended as part of the law of a Territory to which it extends "the Territory" means that Territory and "any Territory" means any of the Territories to which it extends and the Solomon Islands.

(3) The references in Schedule 1 hereto to £200 and £400 shall be construed by substituting for such amounts the amounts set out in columns 2 and 3 of Schedule 2 hereto in relation to each Territory for which amounts are set out in the said columns 2 and 3.

4. (1) Schedule 1 hereto shall take effect as part of the law of the Solomon Islands.

(2) For the purpose of construing the said Schedule as part of the law of the Solomon Islands "the Territory" means the Solomon Islands; "any Territory" means any of the Territories to which the said Act is extended by Article 3 of this Order; for "indemnity" there shall be substituted "restitution"; and for the amounts of £200 and £400 shall be substituted 400 Australian dollars and 800 Australian dollars respectively.

N. E. Leigh.

(a) 1974 c. 20.

(c) 1952 c. 63.

(b) 1890 c. 57.

## SCHEDULE I

Articles 3 and 4

## PROVISIONS OF THE DUMPING AT SEA ACT 1974 AS EXTENDED TO THE TERRITORIES SPECIFIED IN SCHEDULE 2 HERETO AND TO THE SOLOMON ISLANDS.

RECORDED  
IN EXCELSIOR  
2 DEC 1976

(1) Subject to the provisions of this section, no person, except in pursuance of a licence granted under section 2 below and in accordance with the terms of that licence—

- (a) shall dump substances or articles in the territorial waters of the Territory; or
- (b) shall dump substances or articles in the sea outside the territorial waters of the Territory from a British ship, aircraft, hovercraft or marine structure; or
- (c) shall load substances or articles on to a ship, aircraft, hovercraft or marine structure in the Territory or its territorial waters for dumping in the sea, whether in such waters or not; or
- (d) shall cause or permit substances or articles to be dumped or loaded as mentioned in paragraphs (a) to (c) above.

(2) Subject to subsections (3) to (5) below, substances and articles are dumped in the sea for the purposes of this Act if they are permanently deposited in the sea from a vehicle, ship, aircraft, hovercraft or marine structure, or from a structure on land constructed or adapted wholly or mainly for the purpose of exposing solids in the sea.

(3) A discharge incidental to or derived from the normal operation of a ship, aircraft, vehicle, hovercraft or marine structure or of its equipment does not constitute dumping for the purposes of this Act unless the ship, aircraft, vehicle, hovercraft or marine structure in question is constructed or adapted wholly or mainly for the purpose of the disposal of waste or spoil and the discharge takes place as part of its operation for that purpose.

(4) A deposit made by, or with the written consent of, a harbour authority or lighthouse authority, for the purpose of providing moorings or securing aids to navigation, does not constitute dumping for the purposes of this Act.

(5) A deposit made by or on behalf of a harbour authority in the execution of works of maintenance in their harbour does not constitute dumping for the purposes of this Act if it is made on the site of the works.

(6) Subject to subsections (7) to (9) below, any person who contravenes subsection (1) above shall be guilty of an offence and liable—

- (a) on summary conviction to a fine of not more than £400 or to imprisonment for a term of not more than six months or to both; or
- (b) on conviction on indictment, to imprisonment for not more than five years, or a fine, or to both.

(7) It shall be a defence for a person charged with an offence under subsection (1) above to prove—

- (a) that the substances or articles in question were dumped for the purpose of securing the safety of a ship, aircraft, hovercraft or marine structure or of saving life; and
- (b) that the took steps within a reasonable time to inform the Governor that the dumping had taken place and of the locality

1970—No. 26

NEW SOUTH WALES.



REGULATIONS.

MARITIME SERVICES ACT, 1935.

(Published in Government Gazette No. 12 of 30th January, 1970.)

HIS Excellency the Governor, with the advice of the Executive Council, has been pleased to approve of the following regulations made by the Maritime Services Board of New South Wales in pursuance of the provisions of the above Act.

R. W. ASKIN, Premier and Treasurer.

The Treasury, New South Wales,  
Sydney, 28th January, 1970.

The Maritime Services Board of New South Wales (constituted under the Maritime Services Act, 1935), hereby makes the following Regulations under the Maritime Services Act, 1935:—

Citation.

1. These Regulations may be cited as the "Port Authority—Smoke Control—Regulations, N.S.W."

Definitions.

2. (1) In these Regulations—

"Black smoke" means smoke which when compared in the prescribed manner appears as dark as or darker than Ringelmann 4.

"Board" means the Maritime Services Board of New South Wales.

"compared in the prescribed manner" means compared by an observer with a Ringelmann Chart held or fixed in the open air in a position facing the observer and approximately in line with the observer and the source of the smoke being compared, and, if the sun is not visible, so that smoke, so held or fixed that the sun is not visible, is the face of the chart.

"dark smoke" means smoke which when compared in the prescribed manner appears as dark as or darker than Ringelmann 2.

"dense dark smoke" means smoke which when compared in the prescribed manner appears as dark as or darker than Ringelmann 3.

"Ringelmann", followed by a numeral, means the shade denoted by that numeral on a Ringelmann Chart.

"Ringelmann Chart" includes a chart or miniature chart endorsed "Official Smoke Density Chart" by order of the Board.

"smoke" includes fumes, ash, cinders, soot and dust and any one or more of them, alone or in combination with smoke.

(2) A reference in these Regulations to the blowing of soot is a reference to the forcible expulsion from any part of a vessel by any means of deposits resulting from the combustion of any type of fuel.

#### *Emission of Smoke.*

3. (1) If in any port any vessel emits black smoke both the owner and the master of that vessel shall be guilty of an offence against this regulation.

(2) If in any port any vessel emits dense dark smoke both the owner and master of that vessel shall be guilty of an offence against this regulation except where such emission—

- (a) was confined to an aggregate time not exceeding three minutes in any overall period of thirty minutes,
- (b) was necessary for the proper operation of the vessel, and
- (c) occurred as far as practicable from any shore.

(3) If in any port any vessel emits dark smoke both the owner and the master of that vessel shall be guilty of an offence against this regulation except where such emission was confined to an aggregate time not exceeding ten minutes in any overall period of sixty minutes and where the emission was continuous, to a continuous period not exceeding five minutes.

#### *Blowing of Soot.*

4. If soot is blown from any vessel in any port both the owner and the master of that vessel shall be guilty of an offence against these Regulations.

*Special Permissions.*

5. Regulations 3 and 4 of these Regulations shall not apply to the emission of smoke by, or to the blowing of soot from, a vessel if the same occurs, or is carried out—

- (a) after sunrise on any day and before sunset on that day;
- (b) in accordance with the written permission of the Secretary of the Board, or of the Harbour Master of the port concerned, and
- (c) in conformity with every condition stated in such permission.

*Penalties.*

6. Every person who is guilty of an offence against any of these Regulations shall be liable to a penalty not exceeding two hundred dollars.

Dated this sixteenth day of January, one thousand nine hundred and seventy.

The Common Seal of the Maritime Services Board of New South Wales was hereunto  
duly affixed in pursuance of a resolution of  
the Board and in the presence of the Com-  
missioners whose signatures are set opposite  
hereunto and:

D. A. McDowell, Secretary.

(L.)

W. H. BROTHERSON.

B. S. JOHNSON.

(7606)

### 資料 3.1.3. リンケルマン濃度表について

#### ○メトヒ・ハイドロゲンの測定方法

現在利用されているはい煙浓度の測定方法を大別すると

(1) はい煙浓度を規格と比較して定める方法

(2) 一定量の合じんガス中のはいじん(固体物)を分離して、その重量あるいはその他の性質を測定して求めらる方法

(3) 合じんガスを通してみた光源よりの光度(放り出)の強度変化を測定して定める方法

(4) その他の方法

#### ○リンケルマン法(煙浓度法)

(図1)に示すように、直径14cm、奥20cmの円筒上に幅がそれぞれ1.0, 2.3, 3.7, 5.5mm、企型の格子形の黒板を備え、はい煙の浓度を0段階に区分したもので、これの使用方法は、(図2)に示すように、試験片の川と人体同じ高さにカーボードに立て、それがから16m離れた所からこれをながら。煙突と距離との距離は40mとし、煙突口から30~45cm離れた所の煙の浓度(也でなく光の吸収率)とを比較する。

この浓度変化を測定するにあたっての注意事項としては、試験片は太陽の光線に当かず、煙突出口の背景に山、森林、建物のよろめく煙があつてはいけない。また試験片は煙の流れに対して、直角になるよう位置する。はい煙の力はその色によって測定する濃度と比較する。

浓度が時間的に変化するしない場合については、その変化時間に応じて濃度を測定するが、このようなり介在浓度の測定方法に、はい煙浓度半といふものがある。これは濃度に時間的な変化を加えた平均で測定するもので、すなわち一定時間内に測定された各濃度に、その中のその発生時間と累積した濃度を、その一定時間で割った割合を20をかけた値をいう。一つ例をあげて説明する。

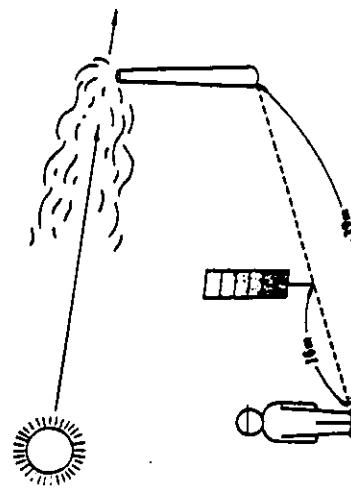
ある煙突のはい煙浓度を1時間にわたって、リンケルマン法と比較測定した結果がつきの通りであった。はい煙浓度半を求める。

6度-8分、4度-5分、2度-30秒、1度-10秒、3度-7分

$$\text{はい煙浓度半} = \frac{5 \times 8 + 4 \times 5 + 2 \times 30 + 1 \times 10 + 3 \times 7}{60} \times 20 = 50\%$$

ということになる。

	0度	1度	2度	3度	4度
濃度	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0度	[ 0.00% ]	[ 0.00% ]	[ 0.00% ]	[ 0.00% ]	[ 0.00% ]
1度	[ 0.00% ]	[ 1.00% ]	[ 1.00% ]	[ 1.00% ]	[ 1.00% ]
2度	[ 0.00% ]	[ 2.30% ]	[ 2.30% ]	[ 2.30% ]	[ 2.30% ]
3度	[ 0.00% ]	[ 3.70% ]	[ 3.70% ]	[ 3.70% ]	[ 3.70% ]
4度	[ 0.00% ]	[ 5.50% ]	[ 5.50% ]	[ 5.50% ]	[ 5.50% ]
5度	[ 0.00% ]	[ 10.00% ]	[ 10.00% ]	[ 10.00% ]	[ 10.00% ]



(図1) リンケルマン法(煙浓度法)

リニケルマン法(煙浓度法)

## 第2章 石炭灰の発生量と発生割合

### まえがき

現在計画中の石炭だき船は、ボイラから発生する石炭灰を、航海中は、航路等で特別な制約がない限り、船外に投棄することにしている。我が国や、諸外国およびIMO（政府間海事協議機関）でも、陸岸からの距離、排出時の比重、投棄時の石炭灰の形状等に対する条件はあるが、特に禁止はされていない。

しかし、将来石炭だき船が増加した時、石炭灰の発生量とクリンカ（ボトムアッシュ）およびフライアッシュの発生割合が非常に重要になってくる。それは現在の計画では、クリンカは直接海上に投棄し、燃焼ガス中に含まれている石炭灰はその殆どが、集じん装置で分離され、フライアッシュとなってクリンカ同様、海上投棄しているが、分離されなかった非常に粒子が微細な石炭灰はばいじんとして、大気へ排出される。従って、石炭灰の発生量と発生割合によって、海上へ投棄される量と大気へ排出される量が変化し、同じ海上投棄されるにしても、クリンカとフライアッシュの海上での挙動、性状が異なるので、環境への影響度合が変わることが予想される。ここでは、石炭灰の発生量と発生割合を造船会社へのアンケートによって調査した。

### 1. 石炭灰の発生量

国際的なエネルギー情勢がますます厳しく増大するなかで、石油に替わるエネルギー源として石炭に寄せられる期待は世界的に大きくなっている。運輸省船舶局の試算によると、必要な石炭（一般炭および原料炭）を運ぶ石炭運搬船の所要船腹量も12万載貨重量トン型換算で、1990年には、世界で313隻、うち日本で114隻が必要としている。その後の石油需要の動向、石炭積出し及び、国内受入港湾設備の整備状況等の影響や、製鉄用原料炭用石炭運搬船が既に発注済であることにより、所要船腹量も増減することが予想されるが、横地で安い石炭を補給できる利点を生かすことにより、それらの内、かなりの割合で石炭だき船となる可能性がある。

表3.2.1 主要輸入炭および国内炭の石炭性状例

Country	JAPAN		CHINA		AUSTRALIA			SOUTH AFRICA	CANADA	INDIA
	Mitsui	Matsushima	Daido	Bellmet	Blair Athol	Invincible	Wallerath			
<u>Heating Value</u>										
HHV, surface moisture free	Kochi	6140	5900	7020	6520	5690	5690	6610	6380	(5690 - 6490)
HHV, ash moisture free	"	5543	6194	6172	8222	7805	8278	8071	7955	(7150 - 7130)
<u>Surface Moisture</u>										
<u>Petrographic Analysis</u>										
Inherent moisture	%	1.6	2.2	3.4	2.8	4.7	2.7	3.2	2.6	-
Ash	%	26.1	25.4	10.7	17.9	9.6	16.6	14.9	17.2	15 - 19
Volatile matter	%	36.9	35.0	24.1	31.6	29.4	32.6	29.3	24.8	22 - 36
Fixed carbon	%	35.2	37.0	47.7	56.3	48.1	52.6	55.4	42 - 56	44.8 - 46.5
<u>Ultimate Analysis</u>										
Carbon	%	79.0	80.6	81.8	78.3	83.0	77.2	80.2	75 - 87	81.0
Hydrogen	%	6.1	4.6	5.0	4.6	5.0	5.0	4.5	4.7 - 5.1	6.0
Nitrogen	%	1.4	0.9	1.5	1.7	1.9	1.7	1.4	1.0 - 1.7	1.4 - 2.3
Oxygen	%	11.9	13.1	11.2	14.8	9.4	15.6	12.9	6.8 - 17	9.3
Total sulfur	%	1.6	0.8	0.5	0.6	0.7	0.5	1.0	0.2 - 1.0	0.5
Combustible sulfur	%	(1.6)	(0.6)	(0.5)	(0.4)	(0.7)	(0.4)	(0.3)	-	(0.5)
<u>Fuel Ratio</u>										
	-	1.0	1.1	2.1	1.5	1.9	1.5	1.8	2.2	1.2 - 2.6
<u>Hard Groove Index</u>										
HGI	11. G.I.	55	49	54	45	68	46	46	54	43 - 71
<u>Ash Analysis</u>										
SiO <sub>2</sub>	%	44.2	57.8	48.2	51.5	59.0	62.1	56.5	41.4	43 - 60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	25.0	26.9	26.9	21.1	25.5	31.0	11.9	31.0	18 - 40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	13.9	3.9	12.6	4.4	3.1	0.9	5.8	9.2	4.1 - 5.3
CaO	%	2.3	2.0	0.4	0.4	1.0	0.1	0.5	0.7	0.3 - 1.4
K <sub>2</sub> O	%	0.0	2.4	-	1.9	0.5	3.3	0.5	0.9	0.4 - 1.2
Na <sub>2</sub> O	%	9.0	2.3	5.0	0.9	2.6	0.3	2.6	5.4	5.0 - 22.4
MgO	%	1.5	1.3	1.1	0.2	0.8	0.3	1.3	1.4	1.2 - 2.7
SO <sub>3</sub>	%	0.7	2.6	1.0	0.1	0.1	0.3	0.5	6.0	3.1 - 7.4
TiO <sub>2</sub>	%	0.0	0.0	1.1	1.2	1.1	0.0	0.7	0.4 - 1.1	3.3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.1	0.1	-	-	0.3	0.1	0.9	0.1 - 1.0	1.0
<u>Ash Fusion Temperature</u>										
Initial deformation	°C	1250	1300	1220	1240	1440	1330	-	1300	1120 - 1300
Softening	°C	1330	1510	1270	1330	1520	1490	-	1340	1200 - 1380
Melting	°C	1340	1530	1220	1360	-	1520	-	1340	1420 - 1460

一方、石炭中に含まれる灰分の割合は、表3.2.1にある様に、約6～26%となっている。現在、オーストラリア船主を対象として建造中もしくは計画中の石灰だき船の場合は、客先仕様書により15～20%としている。

従って、1隻当たり200t／日の石炭を消費した場合、灰分を15%とすると、約30t／日の石炭灰が発生することになり、将来、石炭だき船が、多数建造され、就航した場合、その発生量が、非常に多量となることが予想される。

## 2. 石炭灰の発生割合

石炭の燃焼方式には、ストーカ燃焼、微粉炭燃焼、流動床燃焼等の方式があるが、現在、建造又は計画中の石炭だき船では、スプレッダ（散布式）ストーカ方式を採用している。

石炭灰はその発生採取場所別に分類され、火炉底部から出るクリンカ（ボトムアッシュ）と、ボイラの燃焼ガスと共に運ばれ、過熱器やエコノマイザ下のホッパに落下したり、集じん装置で採取されるフライアッシュとに分類している。ストーカ方式の場合は、クリンカの発生割合が多く、微粉炭方式ではフライアッシュの割合が多い。

## 3. アンケート調査結果と考察

本SRに参加している造船会社7社について各社の試設計船（13万載貨重量トンバルクキャリアでストーカだきボイラ2缶搭載）に関するアンケート調査を行った。その結果を表3.2.2にまとめた。尚、7社の内、5社は自社製ボイラを搭載する計画である。

表3.2.2 石炭灰の発生量と発生割合の造船会社に対するアンケート結果

注) ボイラ数は2缶／1隻である。

項目		A	B	C	D	E	F	G
灰処理装置 計画時のボイラ蒸発量 缶	t/h	(常用) 45	(常用) 25	(常用) 30.4	(最大) 35	(最大) 34	(最大) 35	(最大) 32
全上時 の石炭消費量 缶	t/h	5.2	3.2	3.45	約5	約4*3)	5	8*4)
想定燃料炭 の灰分	%	15	17	20～22	15*1)	20	—	18
クリンカ 発生割合	%	80	85	75	75～80	72	80～85	70
全上設計上 のマージン	%	4～5	10	10	*2)	—	10	10
フライアッシュ 発生割合	%	20	25	25	20～25	45	15～20	30
全上設計上 のマージン	%	25	10	5	*2)	—	10	10
備考					*1) 乾炭ベース HCV(乾炭高位) =約5500 kcal/kg SH出口 61.5k 480°C *2) BLR最大にて設計し マージンは設けない	*3) 湿炭ベース HCV =約6390 kcal/kg		*4) 湿炭ベース HCV = 6060 kcal/kg

### 3.1 石炭灰の発生量

#### (a) ボイラ蒸発量

会社間でバラツキがある。これは、推進プラントのシステムは大体同じなので、所要推進出力や、石炭および石炭灰の輸送システムの相違による所要電力等の相違によるものと思われる。灰処理装置を最大蒸発量ベースで計画しているのは4社である。残り3社は常用蒸発量ベースで計画している。

#### (b) 石炭消費量

計画ベースの石炭の発熱量、ボイラ効率およびボイラ蒸発量によって当然相違する。石炭消費量／ボイラ蒸発量比は0.113～0.142で0.115～0.130が最も多い。

#### (c) 灰分の含有率

15～20%の範囲にある。各社の計画ベースの石炭の銘柄は不明であるが、殆どはオーストラリア炭と予想される。

### 3.2 石炭灰の発生割合

#### (a) クリンカ

発生割合は70%～75%未満が2社、75%～80%が3社、80%～85%が2社であった。マージンは10%が4社あり、内2社はボイラの最大蒸発量ベースの上に更に10%取っている。マージンを取っていないのは2社で、内1社は、ボイラ最大蒸発量ベースで計画しているので、それ以上のマージンは取らないとしている。他の1社も最大蒸発量ベースで、クリンカとフライアッシュの合計が100%を超えてるので、既にマージンを含んでることになる。マージンを除くと約62%となる。

#### (b) フライアッシュ

発生割合は15～45%とばらついている。一番多い範囲は20～25%である。45%の場合は既にマージンを含んでいるので、それを除くと38%位と予想される。フライアッシュとクリンカの発生割合が100%を超えてるのが2社、100%未満が1社ある。この辺は各社のノウハウであるが、反面、石炭性状により変わるので、明確に決められない様子がわかる。

マージンが多いのは25%があり、10%が3社ある。クリンカと比較し、同じなのが3社、大きいのと小さいのが各1社であった。残り2社はマージンを取っていないが、理由はクリンカの場合と同じである。

尚、ここでいうフライアッシュは発生した石炭灰からクリンカを除いたものであり、前述した様な、ばいじんとして大気へ放出されるものも含んでいる。

## まとめ

アンケート回答をみると、会社間でかなり相違していることがわかる。その理由は、各社のボイラの計画に経験に基くノウハウ的要素があるので、深究することは出来なかった。特にクリンカとフライアッシュの発生割合が85：15から62：38（E社データで、マージンがクリンカとフライアッシュが同一と仮定した）まで、開きが大きい。石炭の性状や粒度分布の相違によると思うが、ボイラ設計および灰処理設備の容量決定の難しさが予想される。

今回の調査によって、造船各社の計画している石炭だきボイラの石炭灰の発生量および発生割合の状況が分かった。

## 引 用 文 献

運輸省船舶局関連工業課：船舶への石炭の利用について、  
昭和55年3月

## 参 考 文 献

日本産業機械工業会：石炭灰の有効利用システムの研究開発Ⅰ、  
昭和55年3月

## 第3章 石炭灰の性状と環境への影響

### まえがき

石油危機以来、陸上では、世界的に脱石油政策として、代替エネルギーの推進を計ってきたが、“イラン政変” “米スリーマイル島原発事故” “国際エネルギー機関（IEA）の石炭利用の促進勧告”等を背景に石炭資源の見直しを本格化し、我が国でも大容量石炭火力発電やセメント製造用燃料の石油から石炭への完全転換の推進等が行なわれてきている。

石炭への転換が活発化するにつれ、多量に発生する石炭灰の処理、利用が大きな問題となりつつあり、現在、官民の研究機関等で、環境対策上から、その化学的性状の究明、検討が行なわれている。

石炭だき船は昭和25年（1950年）頃迄は、世界中で多数建造され、就航していたが、当時は特に環境上の問題は発生しておらず特別な規制もされていなかった。今日でも、現状、特に船舶からの海洋への石炭灰投棄に対する規制はされていないが、当時に比較し、環境汚染に対する関心が高まっているので、将来、何らかの規制がなされる可能性もある。本章では陸上での、主に微量有害物質に対する規制を参考に、その問題点の有無を調査する。

### 1. 石炭灰の性状<sup>(1)</sup>

石炭灰の性状は、燃料炭の炭種と、その産炭地および燃焼方式によって異なる。

燃料炭の炭種は、無煙炭、瀝青炭、褐炭に大別される。

無煙炭は、石炭の中で最も炭化度の進んだものであるが、揮発分が少なく、燃焼性が悪い。瀝青炭は揮発分が多く、また、水分が少ないため、燃焼しやすい石炭であり、現在、建造および計画中の石炭だき船や、現在、我が国で稼動している石炭燃焼ボイラも、又、今後建造予定の大容量石炭燃焼ボイラもこの炭種に属するものか使用される方向である。褐炭は石炭の中で、最も若い石炭で、炭化度が低く、また、水分の多い石炭である。（表3.3.1）

表3.3.1 本邦石炭の分析値<sup>(2)</sup>

		元素分析 (d.a.f.) (%)					工業分析 (%)				発熱量 (kcal/kg)	
		C	H	O	N	S	M	A	VM	F C		
褐炭	天北目無	70.37	4.74	23.78	1.10	0.0	12.80	1.52	35.62	50.06	1.41	5730
	中郷	74.33	5.26	19.29	0.95	0.17	13.32	3.96	38.03	44.69	1.18	5910
	鹿島	77.94	6.07	12.62	0.65	2.72	4.11	5.02	50.73	40.14	0.79	7310
瀝青炭	美唄(非粘)	80.27	6.10	11.33	1.86	0.44	3.46	3.86	45.30	47.38	1.05	7580
	赤平(弱粘)	82.29	5.92	9.25	2.29	0.25	3.01	3.21	42.50	51.28	1.21	7830
	三池(粘着)	81.27	5.99	7.82	1.19	0.73	1.10	3.53	44.39	50.98	1.15	8330
	夕張(粘着)	84.85	6.16	7.20	1.78	0.01	1.13	2.67	44.85	51.35	1.15	8450
	端島(強粘)	86.59	5.56	6.48	1.22	0.15	1.24	2.09	35.91	60.76	1.69	8400
	矢岳(強粘)	89.55	4.86	3.07	1.88	0.64	1.11	2.74	21.29	74.86	3.52	8450
無煙炭	魚貫	91.16	3.97	2.56	1.78	0.53	1.68	1.80	10.80	85.72	7.94	8400

注) d.a.f : 無水無灰ベース A : 灰分 F C : 固定炭素

M : 水分

V M : 挥発分

固体燃料には一般に灰分が含まれており、石炭の工業分析の灰分は、石炭を約800°Cで加熱灰化した時の残さであり、石炭中の無機質の量を示すものではなく、また、石炭の燃焼廃物と必ずしも完全には一致しない。無機質の中には、灰として固定されるかどうか燃焼条件により変わるものがあるからである。例えば、硫黄はSO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>となって飛び去るが、一部は硫酸塩を形成して灰に捕捉され、更に、高温では硫酸塩も分解する。また、重金属元素でも揮発性、昇華性の強い化合物が存在する。しかし、灰分分析値が燃焼廃物の大体の目安となる。

石炭中の無機成分の起源は次の3種に区分される。

- (1) 原料植物に起因するもの。
- (2) 堆積および石炭化過程において物理的に混入したもの。
- (3) 堆積後、地下水などにより、または、地質的作用により、石炭中に外部より供給され、または外部に取り去られるもの。

石炭中の無機成分が、上記のどれに属するかを判定するのは、非常に困難であるが、新生代の石炭については概念的にそれぞれ次のように推論されている。

- (1) ナトリウム、カリウム、カルシウム、ほう素、バナジウム
- (2) 白金属元素、ジルコニウム、チタン、クロム、タンクステン、モリブデン、ケイ素、アルミニウム
- (3) 銅、鉛、亜鉛、銀、ひ素、マンガン、ほう素、ゲルマニウム、カリウム、インジウム、ハロゲン属元素

これらの元素の含有量については多くの研究が、我が国および外国にある。<sup>(3)</sup>

産炭地別の石炭灰の組成および性状も陸上用として多数分析されており、各国における石炭の品質に大差があることから、著しく相違することが示されている。例えば、日本のフライアッシュは米国並びにヨーロッパ諸国のものに比較し、SiO<sub>2</sub>の含有量が特に高いとか、日本の石炭が一般に灰分と揮発分が多く、粘結性が弱いので、フライアッシュの粉末度が高い等である。

燃焼方式による相違は、通常陸上では微粉炭燃焼方式であり、発生する灰は高温で溶融した灰のため、高温灰といわれ、化学的に安定した灰であるが、ここで対象としているストーカ燃焼方式の場合は、石炭灰の性状分析例が無いので、ハッキリしない。

## 2. 環境への汚染に対する規制

既に第1章で述べたように、石炭灰の海洋投入処分は、我が国の法律や、IMOの規則等によって制限されている。我が国では「海洋汚染および海上災害の防止に関する法律」により船舶から海域に排出される廃棄物を規制している。石炭だき船から排出される石炭灰はこの法律でいう海洋投入処理可能廃棄物（輸送活動、漁ろう活動その他船舶の通常の活動に伴い生じる廃棄物のうち熱いやく減量15%以下の状態にしたものおよび無機性のもの）にあたる。世界的には船舶からの海洋汚染を防止するために「1973年の海洋汚染防止条約（1978年に、これを一部修正した議定書が採択されている）」がある。

これらの規則は、石炭灰の物理性状や排出海域についてのもので、その化学的性状については何も述べられていない。従って現状では、陸岸からある程度離れば、石炭灰の海洋への排出は可能であるという考えに立って、石炭だき船を建造および計画しているが、将来、それが現在の陸上並みの規制迄強化されたとして、調査してみると、石炭の化学的性状について規制しているものとして「水質汚濁防止法」および「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」がある。両者が規制しているのは、石炭灰中の9種の微量有害物質である（表3.3.2）

表 3.3.2 陸上での有害物質排出に関する規制内容

関連する法律 関連条文	水質汚濁防止法 法第3条(排水基準) 総理府令第35号(排水基準を定める総理府令)	廃棄物の処理及び清掃に関する法律 施行令第6条(産業廃棄物処分基準)総理府令第5号(金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める総理府令)	
		埋立処分	海洋投棄処分
カドミウム及びその化合物	0.1	0.3	0.1
シアノ化合物	1	1	1
有機りん化合物	1	1	1
鉛及びその化合物	1	3	1
六価クロム化合物	0.5	1.5	0.5
ひ素及びその化合物	0.5	1.5	0.5
水銀及びアルキル水銀 その他の水銀化合物	0.005	0.005	0.005
アルキル水銀化合物	検出されないこと	検出されないこと	
P C B	0.003	0.003	0.003

(単位 mg/l)

尚、陸上の場合、石炭灰は、上記の排出基準を超えるような有害物質を含んでいないのが通常であり、このことは、従来より行なわれている灰捨場への投棄処分あるいは石炭灰による埋立計画が許可されることからも実証され、化学的に安全であるとしている。<sup>(1)</sup>

### 3. アンケート調査

我が国の代表的な石炭関連の3研究機関へ表3.3.3の「石炭及び石炭灰性状調査表」を送付し、回答を依頼した。

#### 3.1 アンケート調査項目

##### (a) 対象とする炭種

対象炭種は本研究報告書のまえがきで述べた14種類(日本炭-2、オーストラリア炭-3、南アフリカ炭-2、カナダ炭-2、米国炭-3、中国炭-2)とした。研究機関に、上記以外の炭種で、分析データがある時は、それも併せて記入してもらう様に依頼した。

##### (b) 対象とする性状

石炭の産地、銘柄、性状、石炭灰の成分、溶融温度、採取場所および有害物質について調査した。石炭灰については、クリンカとフライアッシュに分けて記入欄を設けた。

### 3.2 アンケート調査結果

回答があったのは、1機関のみであった。残り2機関の内、1機関は、現在、石炭灰の再利用について研究中であり、有害物質については、諸外国の文献等からも無害といわれているので、測定していないとのことであった。残り1機関は、分析データはあるが、現在整理中とのことであった。

1機関の回答内容は表3.3.3(a)、(b)、(c)の通りである。有害物質については表3.3.3(a)のオーストラリア炭、南アフリカ炭、カナダ炭各1種類のみ分析しているが、いずれも表3.3.2の排出規準以下との

ことであった。

尚、石炭灰は、実際のボイラで発生したものではなく、実験用の電気炉で石炭を灰化したものである。

#### 4. 調査結果の考察

回答のあった3銘柄の石炭灰中の有害物質はいずれも排出基準以下であった。

表3.3.4に参考として、国内の発電所で採取した石炭および石炭灰の分析値を示す。ボイラは微粉炭だけで、石炭灰はクリンカおよび電気式集じん器のホッパ内の石炭灰（EP灰）の性状を示している。

石炭はいずれも国内炭を使用しており、その性状は、多少相違しているが、有害物質については、いずれも規制値以下である。

#### まとめ

陸上でも関心の高まっている重要な研究テーマであるが、石炭中の有害物質は通常、非常に少なく、規制値よりもはるかに少ないといわれているので、殆どその分析例が無く、又、あったとしても、検知されない範囲なので、定量的に比較検討することは困難であった。今後、次の点について検討する必要がある。

- 1) ストーカだきボイラの石炭灰と電気炉で灰化したもの、微粉炭だきボイラのものとは同一性状か、比較する必要がある。生成過程が異なるので、性状も相違する可能性がある。
- 2) ストーカだきボイラの場合、クリンカの発生割合が大きいので、クリンカの性状分析が重要である。
- 3) 今回入手出来なかった炭種についても分析データを集め検討する必要がある。

#### 引用文献

- (1) 日本産業機械工業会 : 石炭灰の有効利用システムの研究開発(I),  
昭和55年3月
- (2) 馬場他 : 石炭化学工業、産業図書(1960)
- (3) (株)建設産業調査会発行 : 廃棄物の処理、再利用、昭和51年4月

#### 参考文献

- 吉田他 : 石油と石炭の化学、共立出版、昭和51年4月

表 3.3.3 (a) アンケート調査結果（その1）

## 石炭及び石炭灰性状調査表

産地		オーストラリア炭		南アフリカ		カナダ	
銘柄		Wark Worth		Ermelo		Coal Valley	
石炭 分析	乾炭高位発熱量	kcal/Kg	7060 (恒湿ベース)	6610 (恒湿ベース)	6540 (恒湿ベース)		
	表面湿分	%	6.2 (到着ベース)	4.3 (到着ベース)	8.4 (到着ベース)		
	固有水分	"	3.4	4.2	7.5		
	灰分	"	12.2 (恒湿ベース)	13.3 (恒湿ベース)	9.1 (恒湿ベース)		
	揮発分	"	29.9	31.6	33.7		
	固定炭素	"	54.5	50.9	49.7		
	炭素	wt %	73.4	71.2	70.4		
	水素	"	4.7	4.7	4.3		
	窒素	"	1.5 (無水ベース)	1.6 (無水ベース)	0.9 (無水ベース)		
	酸素	"	7.4	8.0	14.5		
石炭 灰成分析	全硫黄	"	0.4	0.9	0.2		
	燃焼性硫黄	"	0.4	0.6	0.1		
	燃料比	-	1.82	1.61	1.47		
	粉碎性	H.G.I	56	46	54		
	種類	-					
	SiO <sub>2</sub>	%	69.9	48.1	61.3		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	23.3	28.2	19.6		
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	2.7	5.7	4.4		
	Na <sub>2</sub> O	"	0.2	0.4	0.6		
	K <sub>2</sub> O	"	0.8	0.7	0.6		
石炭 灰	CaO	"	0.5	7.1	7.5		
	MgO	"	0.7	2.4	1.1		
	SO <sub>3</sub>	"	0.2	4.9	3.5		
	TiO <sub>2</sub>	"	1.1	1.2	0.7		
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"	0.3 (定量限界)	0.4 (定量限界)	0.3 (定量限界)		
	溶融温度	°C	>1450	1430	1280		
	採取場所(実ボイラ、燃焼テスト炉等)	石炭灰は電気炉で石炭を灰化したもの。		同左		同左	
	備考						

表 3.3.3 (b) アンケート調査結果（その2）

## 石炭及び石炭灰性状調査表

産 地			国 内		国 内		オーストラリア	
銘 柄			三 池		太 平 洋		Blair Athol	
石 炭 分 析	乾炭高位発熱量		kcal/Kg		6440 (恒湿ベース)		6290 (恒湿ベース)	
	表面湿分		%	—	—	—	14.4 (全水分)	
	固有水分	"	1.2		3.6		6.4	
	灰 分	"	23.5	(恒湿ベース)	17.5	(恒湿ベース)	8.1	(気乾ベース)
	揮 発 分	"	38.0		40.0		26.7	
	固定炭素	"	37.3		38.9		58.8	
	炭 素	wt %	61.5		65.2		72.3	
	水 素	"	4.8		5.3		3.6	
	窒 素	"	0.9	(無水ベース)	1.2	(無水ベース)	1.7	(無水ベース)
	酸 素	"	6.4		9.8		13.4	
石 炭 灰 の 成 分	全 硫 黄	"	2.8		0.3		0.3	
	燃 燃 性 硫 黄	"	2.6		0.3		0.3	
	燃 料 比	—	0.98		0.97		2.20	
	粉 碎 性	H.G.I	—		—		68	
	種 類	—						
	S i O <sub>2</sub>	%	44.8		50.6		53.3	
	A l <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	20.5		24.4		37.6	
	F e <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	7.9		6.6		2.6	
	N a <sub>2</sub> O	"	2.6		1.1		0.2	
	K <sub>2</sub> O	"	1.0		1.0		0.2	
石 炭 灰 の 成 分	C a O	"	10.8		9.7		1.3	
	M g O	"	1.2		2.1		0.9	
	S O <sub>3</sub>	"	6.6		2.8		2.5	
	T i O <sub>2</sub>	"	1.4		0.6		1.0	
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"	0.1		0.9		0.1	
	溶 融 温 度	°C	1300		1360		1480	
	採取場所(実ボイラ、燃焼テスト炉等)			石炭灰は電気炉で石炭を灰化したもの。		同 左	同 左	
	備 考							

表 3. 3. 3 (c) アンケート調査結果(その3)

## 石炭及び石炭灰性状調査表

産地		オーストラリア		中國		中國	
銘柄		Birds Rock		大同		准北	
石炭分析	乾炭高位発熱量	kcal/kg	6400 (恒湿ベース)	7100 (気乾ベース)	6400 (気乾ベース)		
	表面湿分	%	—	9.8 (全水分)			
	固有水分	"	2.0	2.8		2.0	
	灰分	"	18.5 (恒湿ベース)	9.5 (気乾ベース)	19.9 (気乾ベース)		
	揮発分	"	25.1	28.5		27.5	
	固定炭素	"	54.4	59.2		50.6	
	炭素	wt %	66.4	73.8		67.2	
	水素	"	3.7	4.0		3.5	
	窒素	"	1.3 (無水ベース)	0.8 (無水ベース)	1.1 (無水ベース)		
	酸素	"	9.3	11.4		7.8	
石炭分析	全硫黄	"	0.4	0.8		0.3	
	燃焼性硫黄	"	0.4	0.2		0.1	
	燃料比	—	2.18	2.08		1.84	
	粉碎性	H.G.I	50	51		68	
	種類	—					
	SiO <sub>2</sub>	%	60.8	49.5		54.4	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	30.5	15.1		32.3	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	5.1	19.4		2.9	
	Na <sub>2</sub> O	"	0.4	0.4		0.6	
	K <sub>2</sub> O	"	1.0	0.5		1.8	
石炭灰分析	CaO	"	0.2	6.7		4.6	
	MgO	"	0.3	1.6		0.9	
	SO <sub>3</sub>	"	0.1	6.3		2.8	
	TiO <sub>2</sub>	"	0.9	0.4		0.0	
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"	0.2	0.7		0.2	
	溶融温度	°C	1560	1260		1480	
	採取場所(実ボイラ、燃焼テスト炉等)	石炭灰は電気炉で石炭を灰化したもの。		同左	同左		
	備考						

表 3.3.4 国内発電所の文献による調査結果

## 石炭及び石炭灰性状調査表

産 地			国 内 炭		同 左		同 左			
発 電 所			A		B		C			
石 炭 分 析	乾 炭 高 位 発 热 量	kcal/Kg	6,200 (恒湿ベース)			6,200 (恒湿ベース)				
	表 面 湿 分	%	7.0 (到着ベース)			7.0 (到着ベース)				
	固 有 水 分	"	4.2 (恒温ベース)			2.2 (恒温ベース)				
	灰 分	"	16.0		22.0		23.0			
	抑 発 分	"								
	固 定 炭 素	"								
	炭 素	wt %	63.7		62.0		61.4			
	水 素	"	5.0	(無水ベース)	4.1	(無水ベース)	4.1	(無水ベース)		
	窒 素	"	1.0		1.3		1.0			
	酸 素	"	9.5		6.4		6.1			
石 炭 成 分 分 析	全 硫 黄	"								
	燃 烧 性 硫 黄	"								
	燃 料 比	—								
	粉 碎 性	H.G.I								
	種 類	—	クリンカ	E P 灰	クリンカ	E P 灰	クリンカ	E P 灰		
	S i O <sub>2</sub>	%	52.5	51	50	50	54.6	51.6		
	A l <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	31.0	30	24	24	28.3	29.0		
	F e <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	"	6.2	6.5	5	5	3.8	5.2		
	N a <sub>2</sub> O	"			1.2	1.6	1.3	0.8		
	K <sub>2</sub> O	"			0.8	0.8	0.2	0.3		
石 炭 成 分 分 析	C a O	"	6.5	7.0	4	4	5.6	7.3		
	M g O	"	2.0	2.0	1	0.6	0.4	0.6		
	S O <sub>3</sub>	"								
	T i O <sub>2</sub>	"								
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	"								
	溶 融 温 度	°C								
	採取場所(実ボイラ、燃焼テスト炉等)									
	備 考									

付録1 石炭だき船指針各船級協会比較

項目	L R	N V	A B	N K	備考
指針等名称	Guidance Notes For the Burning of Coal in Ships Boiler 1980	Rule Part 4. Chapter 7. Tentative Rules For Coal Fired Ship - 1981	Guide for Ships Burning Coal 1980	石炭だき船の設備 に関する検査要領 1981	
適用	Main Boiler Aux. Boiler	Coal fired Ship	Primary Source of Power	Main Boiler Aux. Boiler	
図面及び資料の提出	主要設備 防・消火設備 石炭性状等	主要設備 防消火設備 石炭性状等 故障解析	主要設備 石炭性状等	主要設備 石炭性状等 ヒートバランス ダンブシステム	通常の図面 等に加える もの
対象ボイラ給炭方式	ストーカ式 (微粉炭)	ストーカ式	ストーカ式	ストーカ式	給炭設備等 については 他方式にも 準用可
設備の二重化	バンカー	2	2 ( 1 でも可 )	2	2 原則として
	移送	2 ( 別の燃焼装置 有、 1 )	单一損傷に対処	2、 単一損傷で 50 %	2 "
	サービス庫	容量 12 Hr 以上	"	2、 "	1
	灰処理	2 Air, Water Supply	同 上	-	2 原則として
	ボイラ	※(Rule に有 )	2 ( 1 の場合、 信 頼性解析 )	1 で可、 但し燃焼 灰装置の 单一損傷 対処	2 " ※ ※ Single. M. Boiler では Emergency Propulsion 要す。
バシカ設備	構造	Simple ( Coal 滞留しない Dust こと )	Simple Slop Bottom 70° 一般 60°、 傾斜 ( Low fric. 45° )	Simple 75° 以上傾斜 ( Low friction lining : 45° )	Simple 十分な傾斜
	板厚	摩損考慮	c.m. 2mm	c.m. 1.5mm Min. 9.5mm	c.m. コロー ジョン マージン
	Outlet	動力式 Local & Other で閉	Closure means	Valves 等	Gate Valve 遠隔 閉鎖(重力式の場合)
	加熱防止	要	要	要	要
	ドレン	-	要 ( 止め弁 )	要 ( 止め弁 )	要
	ビルジ	要	要 ( 他区画と接続 : 逆止弁 )	要 ( 同左 )	要 ( 同左 )
	通気	要 閉鎖装置 Mech.; 遠隔停止	2 Vent. 閉鎖装置 ( 固定 )	2 Vent. 閉鎖装置・指示器	2 Vent. 閉鎖装置
	その他の要求	温度モニタ	温度計測装置、 放爆 構造	offloading 装置	温度計測、 爆発対策

項目		L R	N V	A B	N K	備考
移送設備	制御構造等	Local > Control Other	Pneumaticの場合 2.5 m/s以下: c.m(3) 以上: c.m(4) (表A.2欄) Duct 内 ダスト拡がり防止 発火の注意 爆発防止等 傾斜、開口、通気 部材厚さ	Manual 操作 Daily Hopper Full で Auto.stop Duct } 内に収容 Tunnel } Bonded.	Local > Control Other	一般に Dense Phase を想定している。
	給炭ホッパ	石炭の飛散防止 容量: 12 Hr 運転 できるもの	Single Failure における対処 爆発に対する安全性 十分な容積とする。 Local > 閉鎖 Other			
灰処理	一般 湿灰方式の場合	灰による加熱防止 貯蔵容量 固化防止 腐食防止	同 左 同上 火災防止 貯蔵容量 同 左 クリンカグライ ダ、クラッシャの 設置	他への加熱防止 腐食防止	同 左 水 > 供給源2重化 空気 同 左 ガス漏洩防止	
燃焼装置	制御	ボイラ前・手動 uneven firing の 回避	同 左 One-man Operate 可能とする reliable とする	同 左 連絡装置・計器 給炭 スプレッダ Cool.fan ボイラ	同 左 非常停止装置 集中監視	* I.D.F 設置 を考えている。
	燃焼装置	補助燃焼装置に対するページ、点火	Oil Burning については Rule 参照	安全装置必要 (Rule による)	Oil Burning については Rule 参照	
	通風装置	ガスリークの防止 (I.D.F, F.D.F 有のボイラ)、 バイパス保持 I.D.F 故障で F.D.F 自動停止 (又は空気量制限) 油焚時、ダンバは 全開	— * I.D.F ダンバのインタロック 制御装置故障で I.D.ダンバ開	— * F.D.F., ダンバ故障時 I.D.F インタロック	誘引通風とする。 I.D. ダンバ故障時 開放維持。	
自動化装置 (安全・警報装置)	パンカ移送設備	レベル低下: A 故障: A	故障: No-Coal: A モータ過負荷: A ダスト除去 システム: A	故障: A	停止: A 空気圧低下: A 真空圧上昇: A 脱塵器故障: A	A : 警報
	給炭ホッパ	レベル高位: A レベル低下: A	レベル高位: A ": 移送停止 レベル低下: A	給炭停止: A レベル低下: A	レベル低下: A ": 高位: A	
	ボイラ低水対策	レベル低下: 2×A ": 給炭停止 ": スプレッダ停止 ": 空気供給停止	レベル低下: A ": 低・低: A レベル低下: スプレッダ 停止 ": 空気制限 $O_2 < 4\%$ , $CO_2 > 90\%$ 燃焼性ガス $\leq 5\%$	レベル低下: A レベル低下: 給炭停止 ": スプレッダ停止 ": 空気停止	レベル低下: 2×A レベル低下: 給炭停止 レベル低下: 空気制限	
	I.D. Fan	故障: A ": スプレッダ停止 ": F.D.F. 停止	故障: A ": スプレッダ停止 ": F.D.F. 停止 ダンバ閉: A その他 無人化の規定あり	故障: A ": スプレッダ停止 ": F.D.F. 停止 ダンバ閉: A ": F.D.F. 停止 ": I.D.F. 停止	停止: A ダンバ閉: A ダンバ 駆動装置の停止: A	
	I.D. damper					

項目	L R	N V	A B	N K	備考
自動化装置 (安全・警報装置)	F.D.Fan Damper	停 止：A	停 止：A 閉：A F.D.F.停止 I.D.F.停止 閉：給炭停止	停 止：A	* J 編 自動、遠隔装置(NK)
	燃焼 Air	流 量 低 下：A 流 量 低 下：スプレッダ停止	流 量 低 下：A	流 量 低 下：A	
	給 炭 コントローラ グリッド ホッパ	(有の場合) 停 止：A	停 止：A レベル高：A	停 止：A	
	火炉圧力	—	高 壓：A 高圧：給炭停止 F.D.F.停止 I.D.F.停止	高 壓：A	
	スプレッダ 移動火格子 火格子温度 スプレッダ 冷 却 水	故 障：A 故 障：A	故 障：A 故 障：A 高 温：A 高 温：A 低 壓：A	故 障：A 故 障：A	
	灰 处 理	故 障：A	集灰中間 タンク高位：A 圧送式圧力低下：A 真空式圧力高圧：A 灰ホッパ レベル高位：A	—	
	煙路ガス 排 煙 給 炭 管	高 温：A エミッショジ：A	高 温：A 高 温：A	—	
	蒸 気 ドラム レ ベル	本則による。	圧力高圧：ホッパ 出口弁 閉 圧力高圧：A 温度高温：A レベル高位：A	本則による。	他編による。*
通気設備	必要な場合粉碎、 移送設備に放爆装置	ベント出口に、サイクロン、Filter等を設ける。 オープンデッキへ開口放爆構造 70°以上の傾斜	ベントは専用 排気ダクトはオープンデッキへ開口 メカベンの場合はFilterを設ける 管は70°以上傾斜	ベントは専用 脱塵 ダスト堆積防止 脱塵機の停止装置 放爆など	

項目	L R	N V	A B	N K	備考
危険場所	—	<u>GAS, Dust 危険</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>・パンカ区画</li> <li>・パンカトップに開口を有する閉鎖及び半閉鎖場所</li> <li>・パンカ、ホッパ、粉粧、微粉炭設備の通風ダクト</li> </ul> <u>Gas 危険</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>・パンカ、パンカのダクト、石炭取扱装置からの通風ダクトから3m以内のデッキ上</li> </ul> <u>Dust 危険</u> <p>ダストコントロール装置がない場合</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ホッパ</li> <li>・コンベア内部</li> <li>・石炭準備室</li> </ul>	<u>Category A</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>・パンカ</li> <li>・パンカ、ダクト</li> <li>・開口から3m以内の閉鎖、半閉鎖場所</li> </ul> <u>Category B</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭の堆積する場所</li> <li>・移送設備の開口3m以内の場所</li> <li>・コンベア内部</li> </ul> <u>Category C</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>・開放コンベアの区画</li> </ul>	パンカ 〃 開口部 〃 ダクト ※給炭ホッパ ※移送設備内部 〃 ダクト開口部	※緩和規定あり
電気装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ダスト集積防止</li> <li>・ダスト集積に対処として</li> <li>・IEC Pub.144 Class I.P. 55</li> <li>・温度上昇防止</li> <li>・温度：165°C 120°C (過負荷になるもの)</li> <li>・パンカ内の電気品 IEC Pub.79 Class T1</li> <li>・スイッチ、保護装置をパンカに設ける場合の対策</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・危険場所に見合う電気品</li> <li>・危険場所のケーブルはmetal, braid or armourとする。</li> <li>・Socket-outletの注意</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Categoryに見合う電気品</li> <li>・電線：armored M1 Type (Categ. A～C内のもの)</li> </ul>	ダストタイト防食 ケーブルの布設対策 温度上昇： 温度：165°C 120°C	温度の項で上段は過負荷になるおそれのないものに適用
その他	船舶の動搖等への対策	ローリング、傾斜対策要す	対策要す	ローリング、傾斜対策要す	通常の機器と同程度
	石炭性状	10%以上のッシュを含むものと考える	—	各種石炭性状を考慮	同左 負荷変動対策
	消防設備	防火、消火設備	防火、消火設備	防火、消火	各区画の防消火対策

## 付録2 石炭だきボイラ実地調査報告

### はじめに

本研究部会では、かねてから今回の研究テーマとなっている散布式ストーカボイラプラント、石炭および石炭灰移送装置の運転状況を実地調査することが、各社の調査内容、特に第2小委員会のユーザへのアンケート調査を充実させる上で必要と考えていた所、北海道熱供給公社殿の御好意により、同公社中央製造所を見学する機会が得られたので、その状況を概略取りまとめた。尚、詳細については、各章にてそれぞれ報告している。

### 1. 調査日時

昭和56年10月16日 10時～13時

### 2. 調査場所

北海道熱供給公社中央熱製造所  
(札幌市東区北7条東2丁目)

### 3. 見学者

本研究部会第1および第2小委員会造船会社メンバーの中の希望者  
(石播2、三菱2、日立4、住重2、日本鋼管1、川重1、計12名)

### 4. 同社設立の趣旨

札幌市では、冬期暖房方式として、従来からの個別暖房方式に代り、各建物の暖房装置を1箇所に集中する地域暖房方式を都心部に導入することが、大気汚染防止の最良の方策であるとして、北海道や政府関係機関等の協力を得て、昭和43年、同社を設立し、同46年10月に営業を開始した。

### 5. 中央熱製造所の施設概要

#### 5.1 ボイラ

- ・型 式： 日立造船コーナチューブ型温水ボイラ
- ・蒸発量、缶数：  $25 \times 10^6 \text{ kcal/h}$  (換算蒸気量約49t/h) 石炭焚 2基  
 $40 \times 10^6 \text{ kcal/h}$  石油焚 3基
- ・蒸 気 条 件： 20atg × 200°C (石炭焚、石油焚共)
- ・ストーカ方式： 散布式ストーカ (日立～B A B C O C K製)
- ・通 風 方 式： 平衡通風

#### 5.2 高温水導管

- ・構 造： 二重管方式
  - 内管： 400mm径高压シームレス鋼管 (ケイ酸カルシウム保溫)
  - 外管： 1100mm径高压溶接鋼管
- ・導管往復延長： 29,121m (昭和55年度末時点)

#### 5.3 集じん装置： マルチサイクロン型 5台

出口含じん量 0.2g/Nm<sup>3</sup>以下

#### 5.4 灰移送装置： 真空式

#### 5.5 給炭装置： ベルトコンベア式

## 6. 貯炭場および運炭システム

### 6.1 使用炭の性状

幌内炭を使用しており、主な性状は以下の通りである。

粒 度 : 3 mm～25 mm、 発熱量 : 6,000 kcal/Kg

灰 分 : 14～25 % (通常は17～18 %)

表面水分 : 約3%、 硫黄分 : 約0.3%

### 6.2 貯 炭 場

屋外に屋根付貯炭場が2ヶ所あり、各々、1,200 ton、2,000 tonの容量を持っている。特に撤水はしていない。ここへの持込みはトラックによっている。

### 6.3 運炭システム

- 1) ベルトコンベア4基をジグザグに配置し、貯炭場から供給された石炭を地上約10 mにあるバンカ迄移送する。#1と#2のコンベア間の受け渡し点に、振動スクリーンがあり、25 mm以上の塊炭を取り除いている。
- 2) 石炭ホッパが貯炭場の地下に埋めこまれており、石炭はホッパから、#1ベルトコンベア上に落ちるようになっている。ホッパ部の傾斜は約70度で、コーナは丸みをつけた鋼板を鉢止めしている。
- 3) ベルトコンベアの騒音は空運転であったが、非常に小さく、炭じんの飛散も少なく、かつ掃除が行き届いている。
- 4) バンカの形状は図2の様に懸垂円の断面をしており、上部側壁はコンクリート、下部及び底部は鋼板(厚さ9 mm)を使用している。6年目以降は2年に1度鋼板内面にポリウレタン塗装を実施しており、レベル境界面近くが2 mm／10年位の腐食があるが、その他は腐食も摩耗もない。これはバンカ下部両隅に石炭が常に残っており、鋼板壁面とのすべりが少ないためと推定される。
- 5) バンカはボイラ室の最上段に位置し、外部へ炭じんが漏れないように、窓を少なくしているため、10月中旬でも非常に暑い。しかし自然発火は今迄に発生したこととは無いとのことである。常時、石炭が移動しているからであろう。

## 7. 給炭システム

- 1) バンカ底部から3本のショートにより、自動連続計量器へ落下した石炭は、更にショートにより、ボイラスプレッダへ導かれる。

図3にスプレッダ入口及びスプレッダを示す。バンカ出口ショートは内面ステンレススチール、ボイラ入口ショートはステンレススチールを使用し、石炭の詰まり、腐食を防止している。今迄に詰まったことはないそうである。

- 2) 計量器は国産で、10年間使用しているが、トラブルは発生していない。レベル計も国産のパドル型であるが、摩耗したり、破損したことはない。摩耗や直接石炭があたるのを少なくするため、ショートの上面に装備している。本体のトラブルは無く、上部についているバイブレータの振動により、電線との接続がはずれることが、たまにある程度である。
- 3) スプレッダへの石炭の供給を遮断する方法として、プレート式仕切弁では、上からの圧力が高いため、うまく閉鎖できないので、ここでは上下2段の太いパイプと細いパイプを1本1本押し込んでいく方法を考えている。良いアイディアである。

## 8. ボイラの運転

- 1) 点火方式はまずグレート上にストーカを動かしながら、石炭を少量散布し炭層をつくる。その上に薪を積み、油ギレに火をつけて、点火する。焚き始めの3～5分間位、黒煙が出る。

- 2) 完全に全缶消火することではなく、埋火したり、定検時でも運転中の他缶の温水で暖缶し、すぐに点火出来る様にしている。
- 3) 油ボイラとの負荷調整、石炭の性状が悪くて、煙が出る時に使用する助燃バーナ（油焚き）が装備されているが、最近は殆ど使用していない。
- 4) 石炭の粒度および湿度（表面水分）の変化により、煙の濃度が急変することがある。この場合のみ炉内調整（空気量、散布量及びグレート速度の調整）を行なう。
- 5) ストーカ下には空気ボックスが無いので、局部的な空気量の調整は出来ない。熊手棒でグレート上の石炭の厚さを調整する。
- 6) グレートの温度監視は無い。キー焼損で、ボイラを停止したことはない。定検時に、焼損キーを取換える程度である。
- 7) グレート上の炭量の厚さは 15～20mm 程度で、グレート前端部では殆ど完全に灰となっており、下部ホッパへおちた灰中の未燃分は少ない（時々、未燃分が多く、固まりになって落ちることがあるとのこと）。
- 8) エコノマイザ下部ホッパからボイラ前部側面へ灰を再投入（REINJECT）している。再投入ラインの移送管曲り部も摩耗で穴があき、溶接してふさいでいる。
- 9) スートプロワの作動回数は 1 日 1 回で主として夜間行なう。
- 10) 1 直 5 名で、ボイラ運転を行なっている。職長 1 名、石炭ボイラ 2 名（1 人 1 缶で 1 時間毎に炉内壁や燃焼状態を監視し、缶周りをパトロール）、石油ボイラ 2 名で構成している。灰処理は別、その他に電気、機械保守用各 1 名（日勤）がいる。
- 11) 通常、2ヶ月毎に 1 日缶を止め、炉内（主としてストーカ部）を点検する。
- 12) ボイラの稼動状況は年間平均で、石炭焚き 70 %、油焚き 30 % である。最近、油（灯油）の値段が上がっているので、石炭焚きボイラを主体に運転しているとのことであった。ちなみに石炭／灯油の値段は、昭和 46 年度はトン当たり各々 5 千円／1.8 万円であったが、最近は 1 万円／7 万～7.5 万円とのことである。

## 9. 灰処理システム

- 1) クリンカ、フライアッシュ共真空ポンプによる真空吸引式である。灰処理制御盤上の押ボタンにて遠隔手動で、ホッパ下部弁の開閉、機器の運転を順番に行なっている。1 缶当たりの所要時間は、フライアッシュは 5～10 分、クリンカアッシュは 20～30 分である。
- 2) 移送管が詰まらぬ様、移送中はパイプ内の圧力を規定値以下に保つため、排出量をバルブで調節している。
- 3) パイプの摩耗は、フライアッシュ用は余りないが、クリンカと合流した後から急に激しくなる。直管部は勿論だが、特に曲り部が激しい。図 4 にある様に 90 度の曲りの内側の摩耗が激しく、2 重にパンチを当てている所もある。当社の場合、90 度ペンド正在进行るのは、ゆるい曲りにすると、摩耗する範囲が広くなり、交換部の長さが大きくなるからである。ペンド部は以前は FC であったが、10 日毎に交換せねばならなかったので、FCH11 に変え、インターバルを 1 ヶ月に延長した。パイプは STPG の SCH 80 を使用している。工場内にパイプ及びペンド部の予備が多数用意されていた。
- 4) ボイラのクリンカホッパからの灰処理時は 2 人がかりで 3 時間毎に行なう。1 名はレバーでクリンカの排出量を調節しパイプの詰まりを防止し、他の 1 名はホッパの開口部から棒で灰をならしている。大きなクリンカがあれば、ここで砕き、又は取除く、それでも詰まることがあるので、ハンマリングして対処している。
- 5) 処理した石炭灰は道内の湿地帯の埋め立てに使用している。
- 6) 集じん器はマルチサイクロン式で、出口の煙濃度はリングルマンで 1～2 (0.2 g/Nm<sup>3</sup>) におさえる

計画であるが、石炭の種類や粒度によって変化する。中央制御室の記録では、大体 3 以下、平均 2 である。 $\text{NO}_x$  は 200 ~ 250 ppm、 $\text{SO}_x$  は制限値の約 1/5 である。

### あとがき

- 参加したメンバー全員があらかじめ問題意識をもっていたので、見学中質問が活発に出て、予定の時間はすぐには過ぎてしまった。
- 今回、特に参考になったのは、灰処理システムである。公社の真空吸引式は、殆ど日本で適用した例が無いので見学する機会が無かったからである。特に印象的だったのは、灰処理の実際のオペレーションであった。時間外であったにもかかわらず、実施して頂いたもので、クリンカの排出は、中でも迫力があった。2名の運転員がつきっきりで監視、運転しており、クリンカが流れなくなると、入口弁を開き、ホッパ前面、後面から、棒でかいたり、ついたりし、出口弁は制御盤上の真空計を見ながら、移送管が詰まらぬよう、1人がつきっきりで、開閉をくり返していた。
- ボイラについては、常時、炉内、ボイラ周りを監視しているが、石炭の粒度、性状が一定ならば、余り手間はかかるない様子であった。
- 今回の調査結果を参考にして、本研究を内容の濃いものにすると共に、各社の石炭だき船の計画に反映していくことになるが、特に船内での無人化、省人化を進めるに当り、一層の検討が必要であることを参加メンバー全員痛感した。

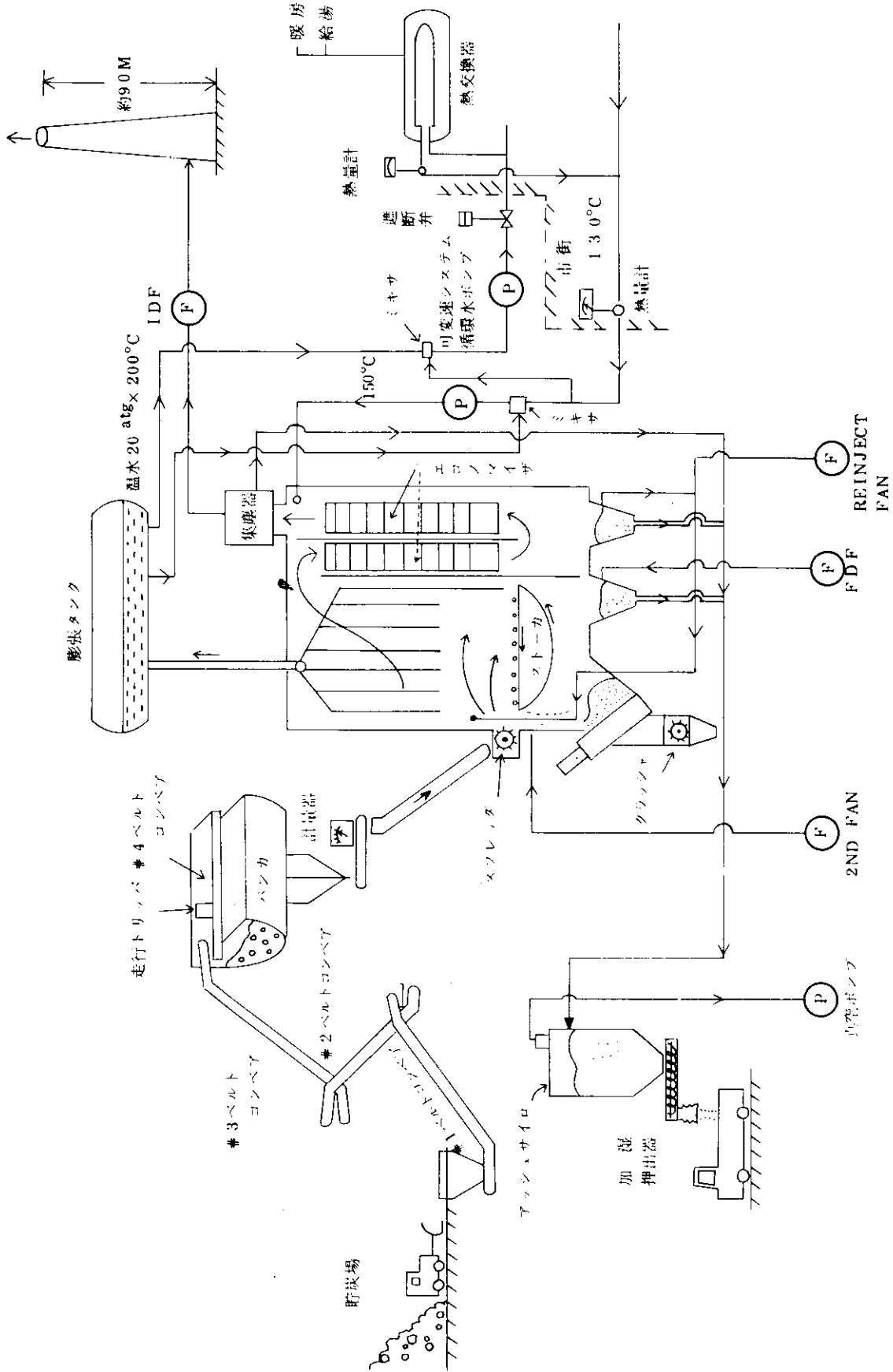


図1 北海道熱供給公社熱供給プラント系統図

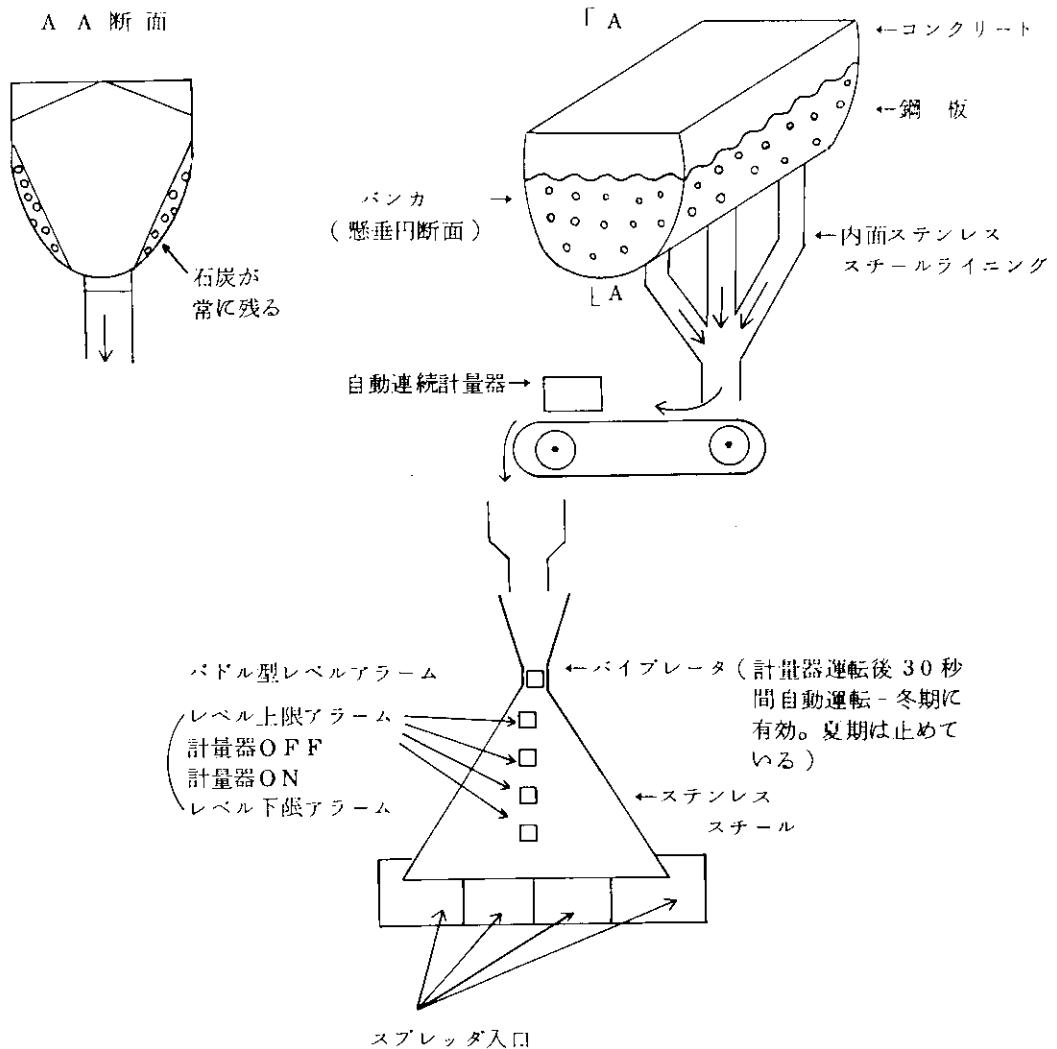


図2 給炭システム

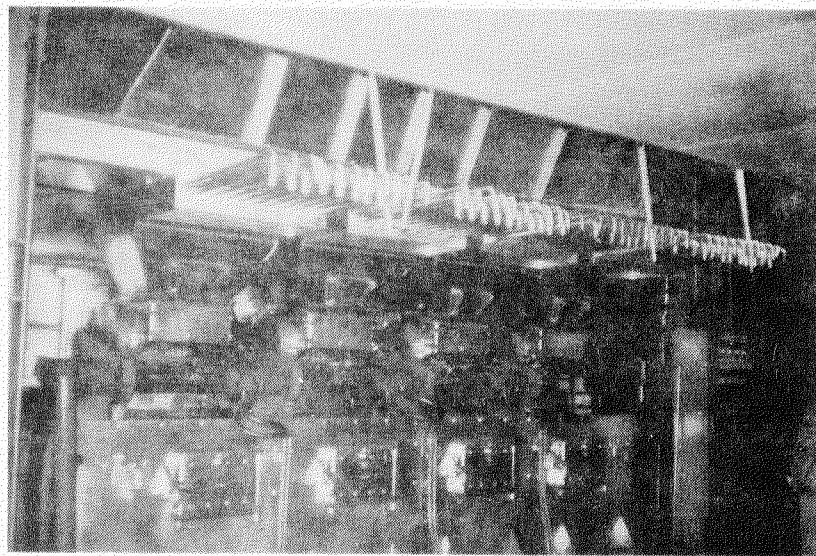


図3 給炭ショート及びボイラ前面

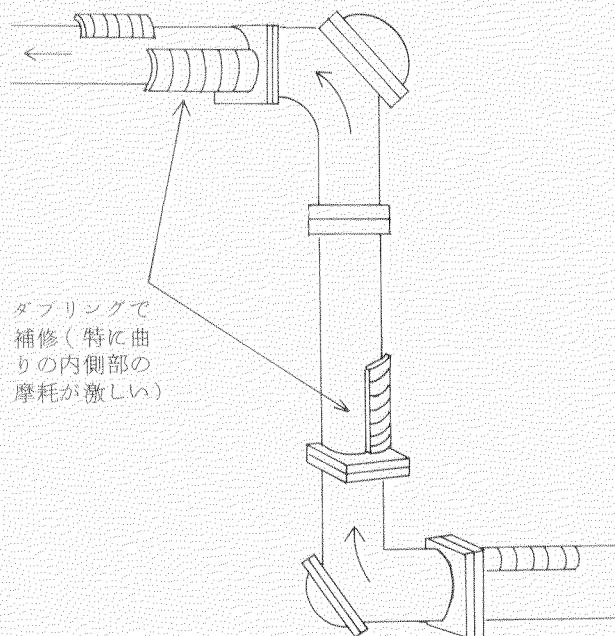
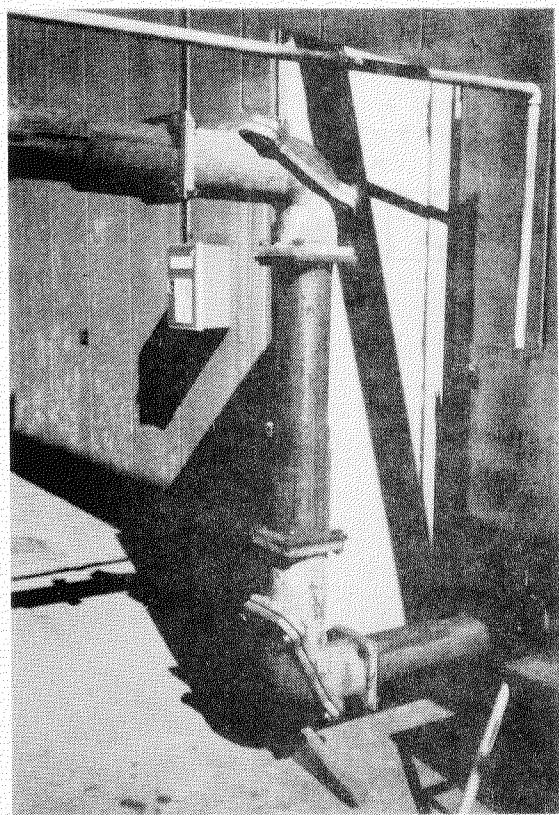


図4 灰移送管曲り部の摩耗