

## 5. 送気システムの信頼性

佐藤吉信\*  
近藤太二\*  
杉本旭\*  
深谷潔\*

### Reliability of Compressed Air Supplying System

by Y. Sato\*  
T. Kondoo\*  
N. Sugimoto\*  
K. Fukaya\*

On pneumatic engineering method, reliability of compressed air supplying system is closely related to the safety of work in pneumatic workrooms.

Therefore in order to improve the system, its reliability was studied in this paper.

The system was grasped and set in the following manner through field investigations. System mission is always to provide the place like pneumatic workrooms with (i) proper pressure and (ii) suitable quality air coping with the proper consume.

Four central functions directly linked to the system mission were extracted and named System Object Functions. (S.O.F).

These functions are System Managing Function, Compressed Air (C.A.) Producing Function, C. A. Sending Function and C. A. Regulating Function. The first function is mainly composed of human activity and the others are mainly composed of mechanical equipment. Each function was broken down to the tip functions and their failure modes and effects were analyzed.

The final system state caused by malfunctions was evaluated in five steps, and these are S1:none of the S.O.F. is stopped and the malfunctions are corrected rapidly, S2:none of the S.O.F. is stopped but the malfunctions are not corrected rapidly, S3:one or more of the S.O.F. are stopped but they are recovered rapidly, and the malfunctions are corrected rapidly, S4: one or more of the S.O.F. are stopped but they are recovered rapidly, but the malfunctions are not corrected rapidly, S5: one or more of the S.O.F. are stopped and they are not recovered rapidly.

In order to calculate the probability that the final system state caused by malfunctions becomes SI (I=1,2,3,4,5) and to clear the time or logic series of the relation between malfunctions and human activity, a kind of probability tree named Evaluation Map of Man-Machine System Reliability

---

\*機械研究部 (Mechanical Engineering Research Division)

ity was proposed.

It is to pass the routes of the map choosing the courses according to the probability that the incident on the path will occur, and to get the final system state having some probability. On this hereditary stochastic process the probability on the path is calculated by FTA based on reliability data. By using this map, not only the reliability of the system can be calculated but also it is easy to evaluate the effect of safety devices on the system.

When some probable problems happened in this system, the probability of the final system state was calculated, and the effect of safety devices on system reliability was evaluated.

5.1 研究目的

ケーソン等高圧室内作業において、有毒ガスの異常発生による中毒、気圧の急激低下による異常沈下や異常出水などの災害が送気システムに関連して発生している。

送気システムが関連した、これ等の災害に対する対策を検討するうえで、Fig.5-1に示すように、\*1送気システムの信頼性は重要な位置を占めている。そこで本研

究は、実際に行なわれている圧気工法の実態を把握し、各種の資料を得て、システムの信頼性を検討し、その向上を図る事を目的としている。

5.2 実態調査について

Table 5-1は昭和52年度中に本研究で行った現場調査件数を、都内と他県について、工法および工事の種類によって示したものである。

また下段には昭和52年1月より12月までに、東京労

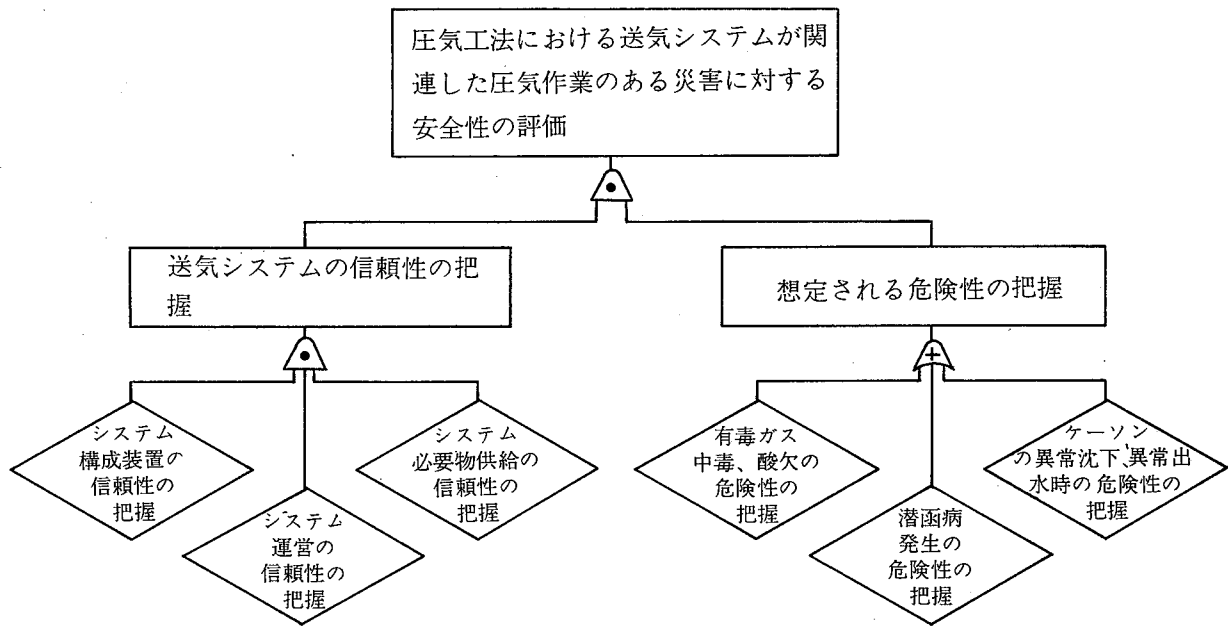


Fig.5-1 Relation between the safety of the work in pneumatic workrooms and the reliability of compressed air supplying system.

送気システムの信頼性と高圧室内業務の安全性との関係

Table 5-1 Number of the field investigations connected with the kind of pneumatic engineering.

工法と工事の種類による現場調査件数

種類	工事による分類					工法による分類			合計	
	上下水道	洞道 (送電通信管路)	ずい道 (交通トンネル)	基礎 (橋脚、水門ダム)	流入渠沈池	ケーソン	シールド	ケーソンとシールド		
現場調査件数	都内	3	5		2	2	4	2	6	12
	他県	3		1	4	1	5	1	3	9
昭和52年の都内工事の総数		37	16	5	2	2	17	39	6	62

\*1 FTAの手法に関する説明は巻末参考文献1)~5)などを参照。

働基準局に届けられた都内の圧気工法件数を示している。

このTable 5-1の「工法による分類」のなかで、「ケーソンとシールド」という項目は、たて坑をケーソン工法で行い、続いて、水平坑をシールド工法で掘削するような場合を言っているが、このようなケースは、上下水道工事、洞道工事、ずい道工事において見られた。

圧気工法は都内だけで62件あって、予想以上に多くの工事が行われている事がわかる。

### 5.3 システム設定

圧気工法における送気システムは、地下における掘削の際の浸水の防止のために、作業室内が浸水圧に対抗できる気圧になるように、作業員の健康を損なわない良質の高圧空気を供給するものである。

このシステムの使命は、作業室や気閘室および再圧室など、必要な場所の適当な消費に対して、常時その場所を、(i) 適当な気圧、(ii) 適当な質の空気によって満たし得るようにする事である。

これ等のシステムの使命は、Fig.5-2のような4個の機能によって達成される。この機能をシステムの目的機能と言う事にする。

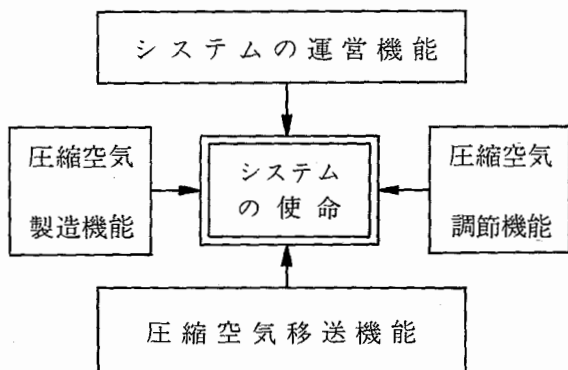


Fig.5-2 System Object Functions and System Mission.

システムの目的機能と使命

目的機能が1つでも損なわれると、それに応じてシステムの使命が阻害される。

これ等の目的機能のうち、圧縮空気製造機能は、コンプレッサーやブローヤなどを稼働させ高圧の圧縮空気を製造する機能である。

圧縮空気移送機能は圧縮空気を目的の所まで移送さ

せる機能である。

圧縮空気調整機能は、送給空気中の油など不純物の除去や、圧力と温度などを適当に調節する機能である。システム運営機能は、システムの運転、監視、保守など管理や運用を行う機能である。

そして、これ等の目的機能はさらに、Fig.5-3のようにそれ等を構成している下位の機能に詳細化される。部品や装置の故障が、どの機能の不調として現れ、システム全体の機能が阻害されたり、阻害されないまでも信頼性低下をひき起すかの検討は、同図に従って、系統的に行う事がよい。

### 5.4 システム要素の調査結果

前節において、現場調査による送気システムの実態を、システム機能論理図に集約設定した。

その各々の構成機能や主な構成装置について、故障や異常モードにどのようなものがあり、目的機能などにどのような影響を与えるかを解析する事が必要である。そして、その機能阻害防止の対策方法を検討し、F.M.E.A.\*2として表に示す。

#### 5.4.1 圧縮空気製造機能

この機能は、計画された質と量の圧縮空気を作り出す機能である。システムの心臓に当り、外気中より空気を取り入れ、設定圧力まで圧縮し、送り出すものでFig.5-3に示すように、その下位機能は、電力エネルギーや燃焼エネルギーを機械エネルギーに変換する「エネルギー変換機能」、機械エネルギーを伝達する「動力伝達機能」、装置や機械の機能を制御する「制御機能」、空気の圧縮を直接行う「圧縮機能」、装置に潤滑を行う「潤滑機能」、装置を冷却する「冷却機能」、電力を供給する「電力供給機能」などで構成される。

##### 5.4.1.1 コンプレッサー

圧縮空気製造機能は、空気圧縮機を中心にして成り立っている。通常の函内送気用に使用されるコンプレッサーはすべて電動式のものであるが、停電時などの予備機や、函内作業の掘削機械動力源\*3として用いられるものには、エンジン式のものが多い。

通常函内送気用圧縮機の種類は、調査によると、全62台のうち、

\*2 故障モード影響解析 (failure mode effect analysis) の略

\*3 高圧空気を動力として作動するピックなど。

- (イ) レシプロコンプレッサー (給油式)  
49台 79 [%]
- (ロ) プロワータイプ圧縮機  
8台 13 [%]
- (ハ) スクリュータイプコンプレッサー (給油式)  
5台 8 [%]

であった。

レシプロタイプコンプレッサーが多いのは、主に経済的理由と、設定圧力がケーソンに適している事からである。プロワータイプは、シールド工法など、掘削面が浅く、設定圧が低くてよい場合に用られていた。またプロワーは振動や騒音が少なく公害対策上優れており故障が少ない。スクリュータイプコンプレッサーは、振動が少なく、騒音が高周波であるので遮音が容易などの理由で用られていた。プロワーは送給空気に、油が混入しないという利点があるが、低圧であり\*4負荷率が低い時、他と比較して、電力消費率が多くなる欠点がある。

レシプロタイプとスクリュータイプのコンプレッサーについて、ある現場でのコストの平均を比較すると

	レシプロタイプ	スクリュータイプ
(イ) 購入費	1	約0.6倍
(ロ) 電力費*5	1.17 [円/m <sup>3</sup> ]*6	1.80 [円/m <sup>3</sup> ]
(ハ) 冷却水費	0.071 [円/m <sup>3</sup> ]	0.085 [円/m <sup>3</sup> ]
(ニ) 油費	0.0062 [円/m <sup>3</sup> ]	0.0260 [円/m <sup>3</sup> ]
(ホ) 修理費	不明	不明
(ロ)+(ハ)+(ニ)	1.25[円/m <sup>3</sup> ]	1.91 [円/m <sup>3</sup> ]

となっている。

無給油式のレシプロタイプコンプレッサー\*7は、実際には使用されていなかった。給油式と比較すると、油の燃焼による有毒ガスの発生からは、本質的に安全である。しかし、ピストンリングやパッキンリングの摩耗による、カーボン粉やテフロン粉\*8が少量ながら発生すること、ピストンリングやパッキンリングの摩耗量測定を、1000時間ごとに行なわなければならないこ

\*4 レシプロタイプやスクリュータイプコンプレッサーと同じ圧力にするには、何台かを直列にして多段圧縮を行わねばならない。また1台で多段圧縮を行う。ターボ圧縮機があるが大型になる。

\*5 以下負荷率50 [%] の連続稼動に換算。

\*6 [円/m<sup>3</sup>] は 1(m<sup>3</sup>) の吸入空気を吐出圧力7 [kg/cm<sup>2</sup>G] にて供給するのに必要なコスト

\*7 無給油式のスクリュータイプ、コンプレッサーも使用されていなかったが、給油式と比較して、油の燃焼による有毒ガスの発生からは、本質安全である。今後の普及が期待されるが、スクリュー部分の故障に対する修理に時間がかかる。

\*8 300 [°C] に加熱された場合非常に有毒な熱分解物を発生する。人体に対する許容量は未定。

と、水分の発生が多い事などもあって、メンテナンスの費用と時間が多く必要とされる。このため、圧気工法のように予備台数が少なく、コンプレッサーを停止させる事のできない場合にはまだ用いられない。

次に圧気工法に使用したものではないが、容量、形式が、圧気工法と一致する50台のコンプレッサーのその1台当りの年間故障件数の平均を、Fig.5-4に示す。

さらに、レシプロコンプレッサーのF. M. E. A. をTable 5-2に示す。

#### 5.4.1.2 冷却機能

この機能は、圧縮機の冷却と、作られた圧縮空気の冷却に必要とされる。冷却媒体としては、水、油、空気があって、水は電動圧縮機と圧縮空気の冷却に用られ、油は圧縮機の内部冷却に使用される。また、空気はエンジンコンプレッサーの冷却に用られる。

この冷却水を何から供給するかによって、次のように分類された。

- (イ) 上水道水を供給源とする。 76.2 [%]
- (ロ) 井戸水を供給源とする。 14.3 [%]
- (ハ) 河川水を供給源とする。 9.5 [%]

水質と供給安定性からは水道水が優先され、それを得られない場合は井戸水を用いていた。さらに、山地などで井戸の揚程が高くなる場合や、海岸に近く井戸水に塩分が含まれる場合は、河川水を用いていた。

水道水利用の場合は、すべての現場で、一度冷却に使用した水を、クーリングタワーで再冷却し再利用させていた。他の場合には、再利用せず、使い捨ての方法を用いていた。これは夏季においても、井戸水、河川水は、温度が比較的低温、水そのもののコストが不要で、クーリングタワーなどの設備が不要となる利点があるからである。しかし、特に河川水などは、水質汚濁や、水取り入れ口などにゴミの詰る事が多いので、注意しなければならない。

この機能のF.M.E.A.をTable 5-3に示す。

#### 5.4.1.3 電力供給機能

電源は停電を考慮すると2系統が望ましいが、現場の地理的事情によって必ずしも可能でない。

現場調査の結果、2系統受電は全体の28.6[%]でしかも都内に限られていた。1系統受電のうち、予備系統として使用するため大型のディーゼル発電機を備えたものが4.8 [%] あった。

停電の原因は、

- (1) 送電線経路の被雷による。これは特に山間部の

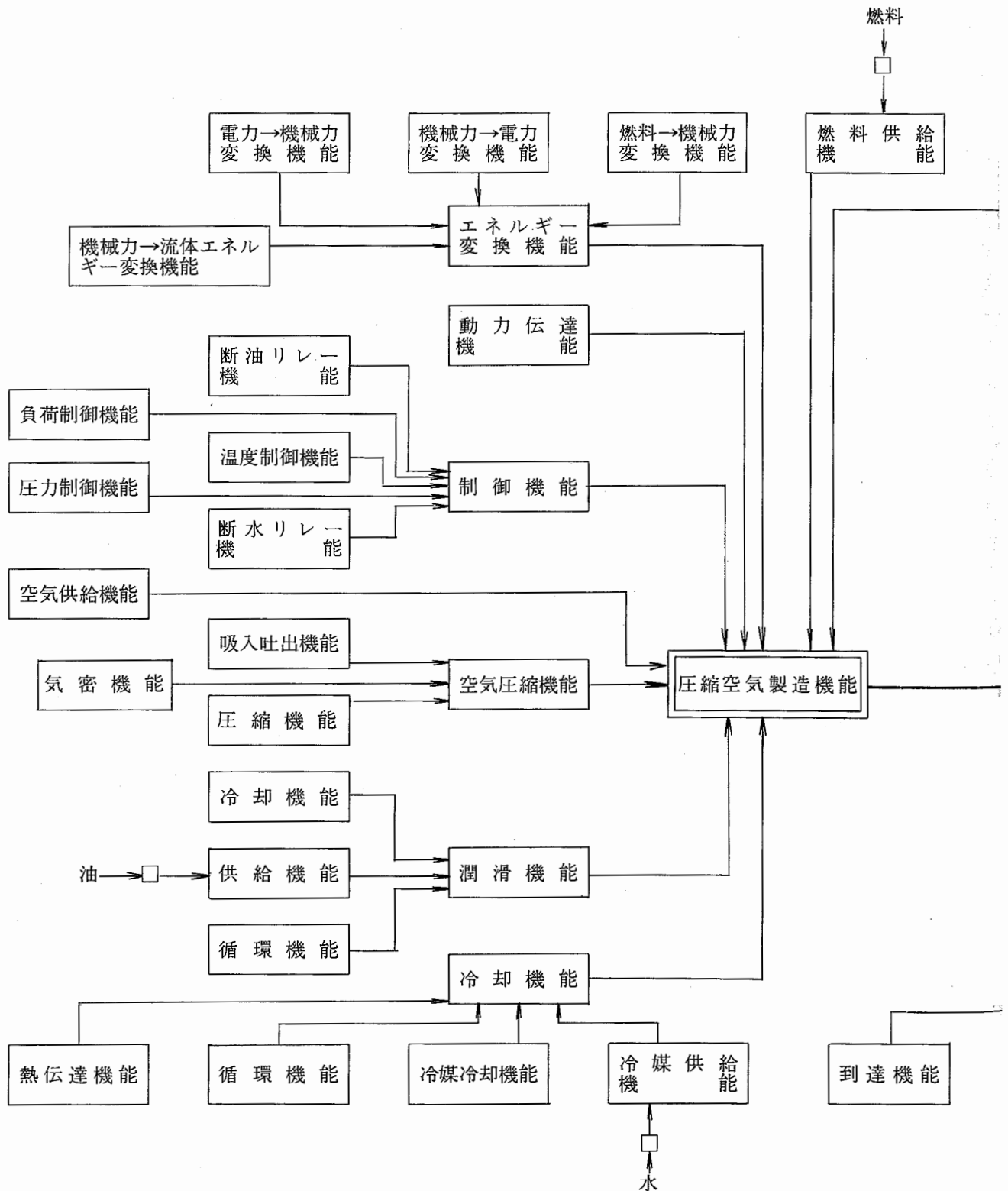
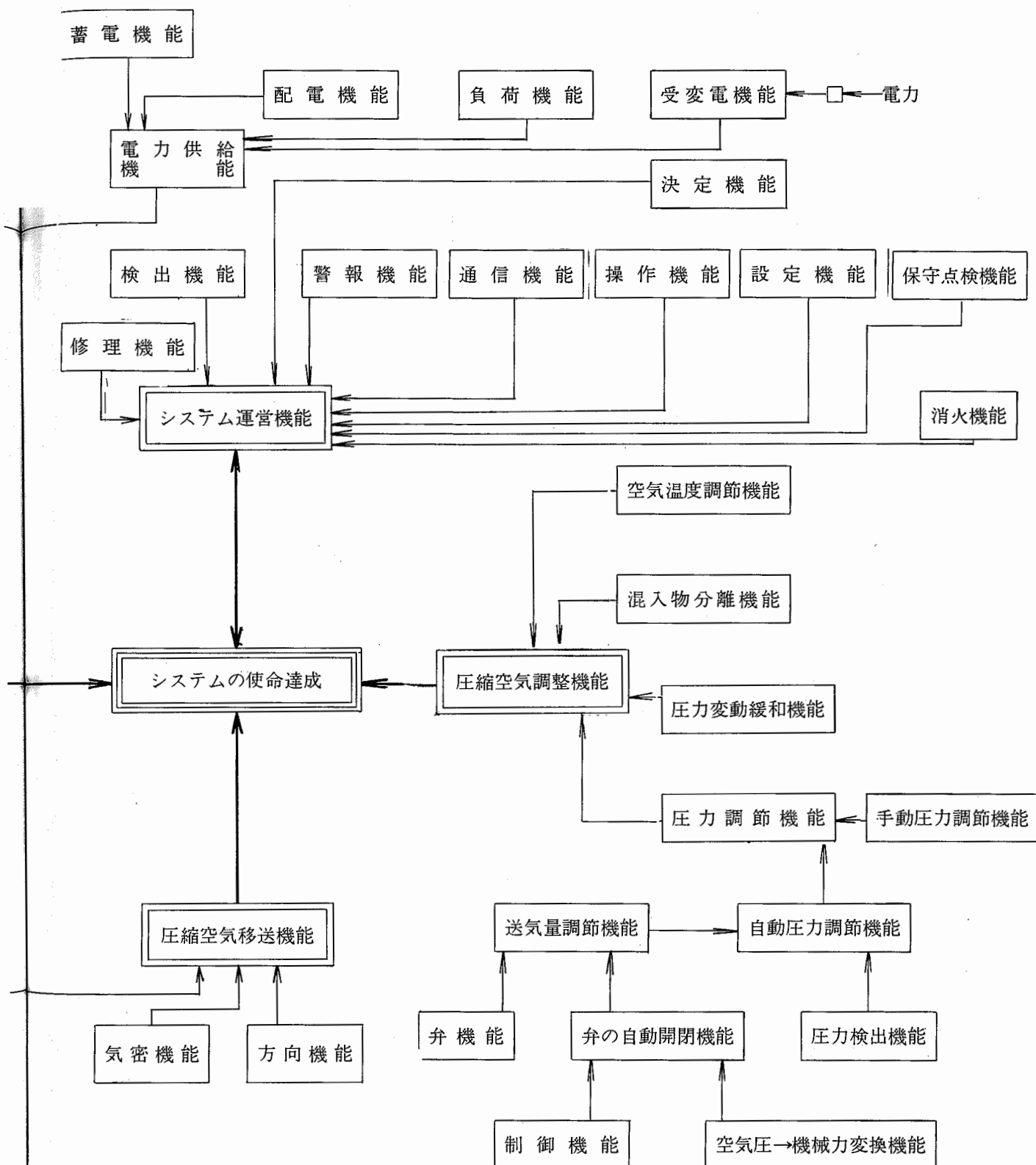


Fig.5-3 Functional logic block diagram of the compressed air supplying system  
送気システム機能論理図



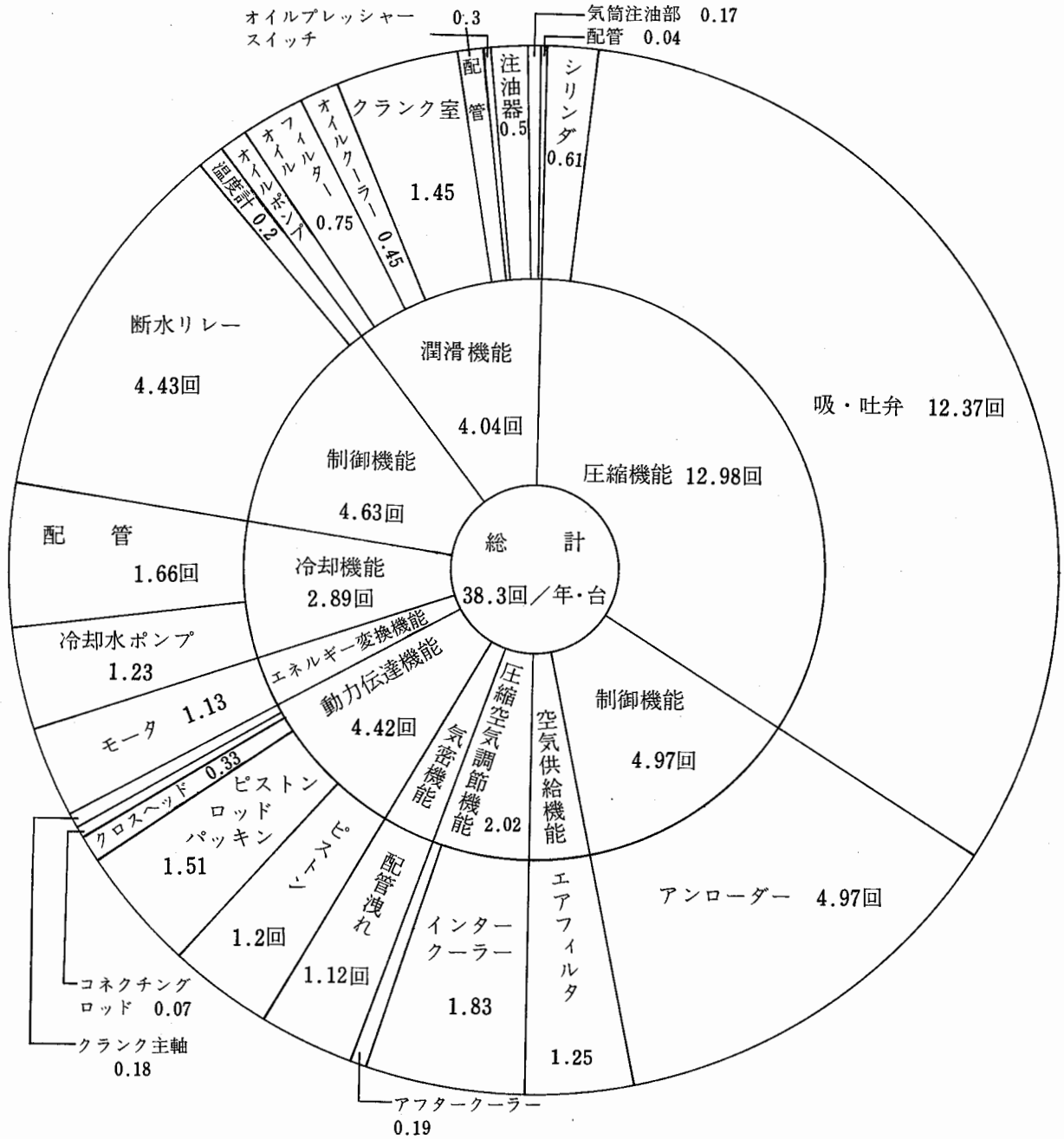


Fig.5-4 Frequency of the troubles of compressors.

コンプレッサ故障別頻度

Table 5-2 FMEA about compressors.

コンプレッサの異常モード効果解析

異常モード	異常の原因	阻害された機能	検知方法と修正方法	対策
エアバルブの故障	バルブの変形, 破損 バルブバネの劣化破壊 バルブガスケットの破壊	吸入吐出機能 空気温度調節機能	分解動作確認 新品と交換 新品と交換 新品と交換	2~3ヶ月ごとの点検 潤滑を十分に 3ヶ月ごとの点検



シリンダの異常	シリンダ内面の摩耗 シリンダジャケットの破壊	気密機能	分解測定 新品と交換	6ヶ月ごとの摩耗量の測定 清掃, 十分な潤滑
ピストンの異常	ピストン外径の摩耗	気密機能	ゲージによるシリンダとのギャップ点検 外径摩耗の検査	1ヶ月(無給油)ごとの点検
	ピストンリングの摩耗	気密機能	巾, 溝とのギャップ検査	6ヶ月(給油)ごとの点検
	ピストンプラグのゆるみ	気密機能	ゆるみ, 抜出しの点検	6ヶ月ごとの点検
軸受メタルの故障	クロスヘッド, ピンメタル, クロスヘッドピン, 小メタル, メンメタル等の摩耗	動力伝達機能	分解, 径のギャップ検査, 摩耗量測定	6ヶ月ごとの摩耗量の測定
潤滑油が十分に送られない	クランクケース内油量の不足	供給機能	油位計を見る 油の追加	6ヶ月ごとの点検 1ヶ月ごとの点検
	オイルストレーナーの詰り	循環機能	分解・清掃	清掃
	配管中の油の洩れ	循環機能	ジョイント締付, 取りかえ	定期点検
	部品の摩耗によりクリアランスが大きいため油が洩れる。	循環機能	分解, クリアランスの検査, 部品の交換	定期点検
潤滑油が十分に送られない	ギアポンプのメタル部の磨耗	循環機能	分解, 摩耗検査, 部品交換	6ヶ月ごとの検査 1年ごとの清掃
	ウイングポンプのつまり	循環機能	分解清掃	
	オイルポンプ駆動装置の故障	動力伝達機能 循環機能 エネルギー変換機能	分解 修理, 部品交換	6ヶ月ごとの点検
	オイルフィルタエレメントのつまり	循環機能	取外し, 清掃	6週間ごとの点検・清掃
	配油管のつまり	循環機能	清掃	フィルタの清掃 油の交換
	オイルフィルタ内のリリーフバルブがつまっている	循環機能	清掃	3ヶ月ごとの検査
	リリーフバルブのスプリングが強すぎる	循環機能 設定機能	調整	調整
	気筒注油器の故障(給油式コンプレッサー)	シリンダヘッド入口のチェックバルブの誤り 配管中の洩れによる	循環機能 循環機能	分解・清掃 ジョイント締直し孔をふさぐ 部品の交換
シリンダの温度が高過ぎる	油の不足	供給機能	油の補充	油量の点検
	油吸入口の詰り	供給機能	分解・清掃	3ヶ月ごとの点検
シリンダの温度が高過ぎる	冷却水温が高い	冷却機能	水ポンプ点検 冷却水量のチェック 修理	2時間ごとの点検

	<p>ピストンまたはシリンダライナに疵がついている</p> <p>吐出弁バルブプレートまたはスプリングの破損</p>	<p>圧縮機能</p> <p>吸入吐出機能</p>	<p>分解・修理・部品交換</p> <p>部品交換</p>	<p>2時間ごとにシリンダ温度点検</p> <p>定期的な部品の交換</p>
シリンダの温度が高すぎる	<p>バルブにカーボンが付着している</p> <p>シリンダの潤滑が不足</p> <p>シリンダ内面の異物の付着</p> <p>ピストンリングの破損</p> <p>冷却水コントロール弁の作動不良</p> <p>冷却水が送られない</p> <p>断水リレーが働かない</p> <p>垢が熱交換器に付着する</p>	<p>吸入・吐出機能</p> <p>圧縮機能</p> <p>潤滑機能</p> <p>圧縮機能</p> <p>圧縮機能</p> <p>温度制御機能</p> <p>冷却機能</p> <p>断水リレー機能</p> <p>熱伝達機能</p>	<p>分解, カーボン除去</p> <p>清掃</p> <p>注油量調節</p> <p>分解, 清掃</p> <p>分解, 音による診断</p> <p>部品交換</p> <p>検査, 修理</p> <p>検査, 修理</p> <p>検査, 清掃</p> <p>検査, 清掃</p>	<p>注油量点検</p> <p>潤滑機能の点検</p> <p>エアクリーナーの点検</p> <p>定期点検</p> <p>8時間ごとの点検</p> <p>常時点検</p> <p>1ヶ月ごとの点検</p> <p>1年ごとの清掃 (使用する水質によって異なる。)</p>
設定圧力まで圧力が上らない	<p>ピストンリングの異常</p> <p>圧力開閉器の故障</p> <p>パイロットバルブの故障</p> <p>コックからの洩れる三方口電磁弁の故障</p> <p>使用量が容量を超過する</p> <p>Vベルトのスリップ</p> <p>圧力計の故障</p>	<p>気密機能</p> <p>圧力制御機能</p> <p>気密機能</p> <p>圧縮機能</p> <p>圧力制御機能</p> <p>動力伝達機能</p> <p>検出機能</p>	<p>分解, 検査, 部品の交換</p> <p>分解, 検査, 修理, 部品の交換</p> <p>分解, 検査, 修理, 部品の交換</p> <p>機械の台数をふやす</p> <p>検査, 調整</p> <p>検査, 修理, 部品の交換</p>	<p>4ヶ月ごとの点検</p> <p>2~3ヶ月ごとの点検</p> <p>半年ごとの点検</p> <p>半年ごとの検査</p>
圧力が高すぎる	<p>圧力開閉器の故障</p> <p>パイロットバルブの故障</p> <p>アンローダーの故障</p>	<p>圧力制御機能</p>	<p>部品検査</p> <p>修理, 部品の交換</p>	<p>3ヶ月ごとの点検</p> <p>3ヶ月ごとの点検</p> <p>3ヶ月ごとの点検</p>
多段圧縮の場合の中間部の圧力が高すぎる	<p>高圧吐出吸入弁の弁板またはスプリングの故障</p> <p>ガスケットの劣化</p> <p>高圧側ピストンリングの破損</p> <p>圧力計の故障</p> <p>低圧側吸入弁, 抑えのダイヤフラムの破損</p> <p>低圧側吸入弁抑えスプ</p>	<p>吸入吐出機能</p> <p>圧力制御機能</p> <p>気密機能</p> <p>気密機能</p> <p>検出機能</p> <p>圧力制御機能</p> <p>圧力制御機能</p>	<p>分解, 検査</p> <p>部品の交換</p> <p>検査, 部品の交換</p> <p>分解, 検査</p> <p>部品の交換</p> <p>検査, 修理</p> <p>検査, 部品交換</p> <p>分解検査</p>	<p>2時間ごとの圧力点検</p> <p>1ヶ月ごとの定期点検</p> <p>3ヶ月ごとの定期検査をする</p> <p>半年ごとの定期点検</p> <p>定期点検</p> <p>定期点検</p>

	リングまたはダイヤフラムボタンの損傷 低圧側のアンローダ配管からの洩れ	圧力制御機能	部品交換 検査, 修理	定期点検
中間部の空気が低すぎる	低圧側吸入吐出弁の弁板またはスプリングの破損 インタークーラー内の洩れ, ドレーントラップシート面からの洩れ 低圧側ピストンリングの損傷 圧力計の故障  高圧側吸入弁の吸入弁抑えのダイヤフラムの損傷 アンローダの異常	吸入吐出機能 圧力制御機能  気密機能  圧縮機能  検知機能  圧力制御機能  圧力制御機能	分解, 検査 部品交換  検査, 修理  部解検査 部品交換 検査, 修理 部品の交換 検査 部品の交換  検査, 修理	1ヶ月(無給油式)ごとの点検  2時間ごとの点検 2週間ごとの清掃  3ヶ月ごとの定期点検 半年ごとの定期検査  3ヶ月ごとの点検  3ヶ月ごとの点検
圧縮機が突然停止する。	油圧変動のため断油リレーが作動する。 断油リレーの誤動作  吐出温度上昇による温度リレーの作動 温度リレーの誤動作  異常負荷による過負荷継電器の作動  継電器の誤動作	潤滑機能  制御機能  冷却機能  制御機能  動力伝達機能 圧縮機能 電力供給機能 電力供給機能	潤滑機能の点検, 修理  断油リレーの点検, 修理  冷却機能の点検と修理  温度リレーの点検, 修理  メタル, シリンダーなど焼付を起こす部分の検査, 修理	定められた定期点検 日常の保守管理をよくする。

Table 5-3 FMEA about the cooling function

冷却機能の故障モードと影響解析

(イ)機能 (ロ)運用時	(イ)故障モード (ロ)他機能への影響	想定原因	検知方法と 修正方法	対策
(イ)冷媒供給機能 (ロ)常時	1(イ)水が貯水槽で欠乏している (ロ)水中ポンプ, 給水ポンプの空回り。 回路に水が供給されない。冷却機能の喪失によるコンプレッサーの停止。 空気調節機能の一部停止	貯水槽の損傷による洩れ  水道の断水による消費水量補充に失敗 井戸水の水位低下による供給不能 河川の水位低下による供給不能 水の取り入れ口にゴミなどが詰る 貯水槽までの配管の洩れ	断水ブザー, 目視, 修理  水の搬入  目視, ホースを下げる 目視, ホースを下げる 目視, ゴミを取り除く 目視, 修理	フローティングスイッチなどを取りつけ水位を監視させる。 貯水槽を適当な大きさにする。 予備貯水槽を設置する  日常点検  日常点検, 沈下槽, ゴミよけを設置する 日常点検, 予備ホースの用意
(イ)冷媒冷却機能	2(イ)水が冷やされない (ロ)コンプレッサー冷	クーリングタワー冷却装置の故障	分解修理	予備装置の設置

(ロ)水温上昇時	却の失敗 圧縮空気の温度が下がらず油回収効率の悪化	停電による。 水がクーリングタワーまで回ってこない。 クーリングタワーの能力不足	予備電源へ切換え 目視、循環機能の点検 温度測定 増設	自動切換器 ディーゼル発電機 送水管路の点検 送水管路を2重にする。 能力に余裕をもたせた計画
(イ)循環機能 (ロ)常時	3(イ)循環機能の異常 (ロ)コンプレッサーの停止 空気温度調節機能、混入物分離機能の停止	クーリングタワー内部の凍結により水が回路を回らない。 水管内の詰り 弁操作の誤り 管路の損傷による洩れ モーターの故障  動力伝達機能の阻害(カップリングなど) ポンプの故障 停電	目視、氷を融解させる。  分解、清掃 点検、修正 目視、修理 予備回路へ切換え  修理 予備装置の作動 予備装置の作動 予備電源入力	温度変化に注意し調節をする。  濁った水は沈殿槽、フィルターを通す。  予備回路、ホース等の準備 予備機能 予備台数 予備台数の確保
(イ)熱伝達機能 (ロ)常時	4(イ)熱交換器の熱伝導が悪い (ロ)コンプレッサーや圧縮空気の冷却効率の低下	熱交換器内面に水垢、泥錆が付着する。	分解 清掃	冷却水水質は良質にしてから使う。 定期的な清掃を実行する。

現場に多く、1ヶ月間に数回生じた所もあった。

(2) 事故などにより、途中の送電線が切断されたり、送電回路の故障によるもの。

(3) あらかじめ予告される停電。

気象に注意をはらう事により(1)は予知が可能であるが、(2)は予知が困難である。(3)は電力会社との連絡に注意をする事で対処できる。

この機能のF.M.E.A.を、Table 5-4に示す。

#### 5.4.1.4 エネルギー変換機能

この機能は、モーターなど電力を機械力に変換したり、エンジンのように燃焼エネルギーを機械力に変換したりするものである。ポンプやコンプレッサーのように機械力を流体エネルギーに変換するものも、この機能に含まれる。

この機能に関連する装置のうち、特に、エンジンコンプレッサーは、停電時の函内送気用として、また掘削動力源として用られ、ポータブルタイプがほとんどであった。このタイプは、空冷冷却を行うので、コンプレッサーの周囲は空気の流通をよくし、\*9過熱を防ぎ、排気ガスを吸入しないようにする事が必要である。又このタイプはその定期試運転を毎日行う所と、一週間に一度行う所があった。電源が2系統の現場でも、掘

削用として1台程度は設置してあったが、大型の自家発電機を設置する事により、エンジンコンプレッサーを用いない所もあった\*10

停電時装置のF.M.E.A.を、Table 5-5に示す。

#### 5.4.2 圧縮空気調節機能

この機能は、インナークーラー、アフタークーラーなどの装置によって構成される「空気温度調節機能」エアフィルター、インナークーラー、アフタークーラー、オイルセパレータ、オイルフィルター、エアレシーバー、ストレーナーなどで構成される「混入物分離機能」、コンプレッサーの脈動圧の緩和や、圧縮空気の消費と生産のバランスを図かるエアレシーバーや、設定圧以上の圧力になると、圧縮空気を放出する安全弁などによって構成される「圧力変動緩和機能」、自動減圧装置や手動減圧弁などによる「圧力調節機能」などによって構成される。

\*9 エンジン冷却空気の流通阻害により、コンプレッサーが過熱して、オイルセパレーター内のウール製エレメントが燃焼し、発生したCOなどによる中毒災害が、最近造船所で生じた事がある。

\*10 一般的に、水による冷却機能を必要とする圧縮機の場合は、電力供給機能の信頼性を向上させると同時に、水による冷却機能の信頼性も、それに比例して向上させねばならない。

Table 5-4 FMEA about the electric power supply function.

## 電力供給機能の故障モード効果解析

(イ)機能名 (ロ)運用時期	故障モード	想定原因	他機能への影	検知方法と修正手段	対策
(イ)受変電機能 (ロ)常時 ただし切換え開閉器は停電時	1.受電しない 2.変電しない	落雷や事故による断線 変電所からの送電停止 避雷器の故障による落雷 キュービクル, 変圧器, 開閉器, 切換開閉器, 遮断器, コンデンサー, 誘導電圧調整器等の機器の故障, ヒューズの遮断	モーター等エネルギー変換機能の停止 検出機能, 照明機能, 警報機能, 通信機能を停止させる場合がある。	メーターの目視 警報ランプ, 警報ブザーによる検知 電源の切換え ディーゼル発電機の始動 蓄電機能による補償。修理	電源を2系総にする。 異音, 異臭, 異常振動, 過熱, 変色, 油洩れ, 汚損などに注意して 保守点検の徹底
(イ)負荷機能 (ロ)常時	電力が負荷されない。	火災による配電盤, 分電盤の故障 ヒューズの遮断 スイッチ, コンセントの不良 台数制御機能の故障	受変電機能と同じ  コンプレッサーの負荷の失敗	予備機能に切替える。 修理	予備機能の設置 保守点検
(イ)配電機能 (ロ)常時	電力が配電されない	架線の支持物(電柱, うで木, うで金がいし, 柱, 支線)の破壊による短絡, 開放, 電線の断線 たるみによる短絡	受変電機能と同じ	予備回路へ切替 修理	十分に強固に設置する。 近接作業の注意, 防護, 標識表示。点検
(イ)蓄電機能 (ロ)停電時など	出力しない	充電されていない バッテリー液の不足 破損	エンジンコンプレッサー, エンジンゼネレータの始動失敗 照明機能, 通信機能の阻害	検査 目視  修理	環境条件に対する補強 保守点検

オイルフィルター\*11は, セラミックスや活性炭あるいはグラスウールを用いるものがあるが, 台数の比率で, セラミックスが90 [%] を占めていた。

自動減圧装置は, すべての現場で用られており, これと, バイパスに手動減圧弁をつけた回路を一組持つものが90.4 [%], 他に予備回路として, もう一組設置したものが4.8 [%], 四組を並列に用いている現場が4.8 [%] あった。

この機能のF.M.E.A.を, Table 5-6に示す。

### 5.4.3 圧縮空気移送機能

この機能は, 圧縮空気を目的地まで, 漏れる事なく

定まった径路を通り移送させ, かつ空気の流れの方向を規制するためのものである。

送気回路中, 圧縮空気に接する部分は, この機能の下位機能である「気密機能」を持つ事になり, 目的地まで到達するために配置された管路, および流れを停止する事のできる弁などは, 「到達機能」を持つ。

また逆止弁など, 空気の流れの方向を規制するものは, 「方向機能」を持つ。これ等の下位の機能によって構成されるF.M.E.A.をTable 5-7に示す。

\*11 ただし, ポータブルタイプなど組込み式は別とする。

Table.5-5 FMEA about the emergency equipments.

非常用装置の故障モード影響・解析

(イ)故障モード (ロ)運用時	想定原因	他機能への影響	検出方法と 修正方法	対策
1(イ)エンジンコンプレッサーが動かない。 (ロ)停電時または電動コンプレッサーが故障時	操作の誤り 燃料がない バッテリーの放電 故障	圧縮空気製造機能の阻害	目視, やり直し, 検査, 燃料補充, 検査, 充電, 予備 電源の利用 分解, 修理 部品交換	訓練 点検 定期試運転  保守, 点検 さらに予備の用意
2(イ)発電機が動かない (ロ)停電時	操作の誤り 燃料がない バッテリーの放電 故障	ポータブルタイプは函内外照明や連絡機能の阻害。 コンプレッサー用は上記他, 圧縮空気製造機能も阻害	目視, 検査 補充 充電, 予備電源の利用 分解, 修理 部品交換	練習 点検 定期試運転 保守, 点検

Table.5-6 FMEA about the Compressed Air Regulating Function

圧縮空気調整機能の故障モード影響解析

(イ)機能名 (ロ)運用時	故障モード	想定原因	影響	検知方法 修正方法	対策
1.圧力調節機能 (イ)弁の機能 (ロ)常時	弁と弁座が離れない 空気を通さない  空気が流れすぎる	温度低下によりドレン, 水分が凍結する。 ドレン, 異物による詰り凍結, 錆 弁座, 弁体の変形	送気量が調節できない。 空気が送られない  高圧にする	検査 加熱, 清掃 分解, 検査 清掃 分解, 修理	保温  ドレン抜き 保温 保守
(イ)弁の自動開閉機能 (ロ)常時	空気圧を弁開, 閉力に変換しない	ダイヤフラムの破損 ダイヤフラム室の破損 弁棒の破損 調節バネの破損 制御回路にドレン, 異物, 錆が詰る	弁を開閉しないため空気量調節不能  高圧にしたり低圧にする。	分解検査 清掃 分解, 修理	ドレン抜き ストレーナーの設置 保守
(イ)圧力検出機能 (ロ)常時	空気圧を検出しない。	ブルドン管の破損 ブルドン管の変形 検出管の詰り	正しい制御の不能	分解検査 修理清掃	良質空気の送気
2.(イ)空気温度調節機能 (ロ)常時	温度が高い	冷却機能の阻害による冷却不能か能力低下 調整設定の誤り コンプレッサーの異常 加熱による冷却能力の超越	油ドレンなど混入物分離が阻害される。 ホースなどゴムの劣化 ドレンなどの燃焼による有毒ガスの発生	温度計, 警報器による冷却機能の修正 冷却水の流量を増加させる。 コンプレッサーの修正	冷却機能の保守点検 温度に注意し流量設定を確実にする。 ドレン抜きを確実にする。 可燃物の排除

	温度が低い	冷却水量の調節設定の誤り 水量調節弁の故障	減圧弁など凍結し易くなる。 作業室の温度低下	温度計を目視設定しなおす 修理	温度計に注意する。
3.(イ)混入物分離機能 (ロ)常時	油, ドレンが分離されない。	空気の湿度が下がらない。 フィルターのよごれ セパレーターの故障	回路中の詰り。 作業室に油の混った空気を送る。 可燃物の蓄積	臭い フィルターの清掃 修理	定期清掃 点検, 保守
4.(イ)圧力変動緩和機能 (ロ)エアレシーバーは常時 安全弁は設定圧以上になったとき	設定圧以上の高圧になる	安全弁の故障	回路中の破壊	圧力計を目視  弁を開放する 修理	定期点検

Table.5-7 FMEA about the Compressed Air Sending Function

## 圧縮空気移送機能の故障モード影響解析

機能	(イ)故障モード (ロ)運用時	想定原因	他機能への影響	検出方法と修正方法	対策
方向機能	1(イ)空気が逆流をする。 (ロ)圧縮空気製造機能が阻害された時	フラッパーバルブの故障 逆止弁の故障	システムの使命の阻害	検査 修理, 清掃 部品の交換	ドレン, 異物などが弁に入らないようにする 保守点検
気密機能	2(イ)空気が洩れる (ロ)常時	回路中圧縮空気と接している部分の破損 シール, パッキンの劣化 継ぎ部分のゆるみ	送気能力が低下する。 急激な減圧	漏洩音による検査 修理, 部品の交換	パッキン, シール類の点検 継ぎ部分の点検 回路の防護
到達機能	3(イ)空気が止まる (ロ)常時	回路中異物が詰まる。 弁の故障 弁の誤操作	目的地の圧力低下	圧力計の目視 コンプレッサーの稼働を調べる。 分解清掃 弁の操作修正	ドレインの除却排出 弁部の表示を明確にする。

## 5.5 システムの信頼性解析法

送気システムの目的機能が異常になると, 工事の進行は停滞したり, 災害につながったりする。<sup>\*12</sup>

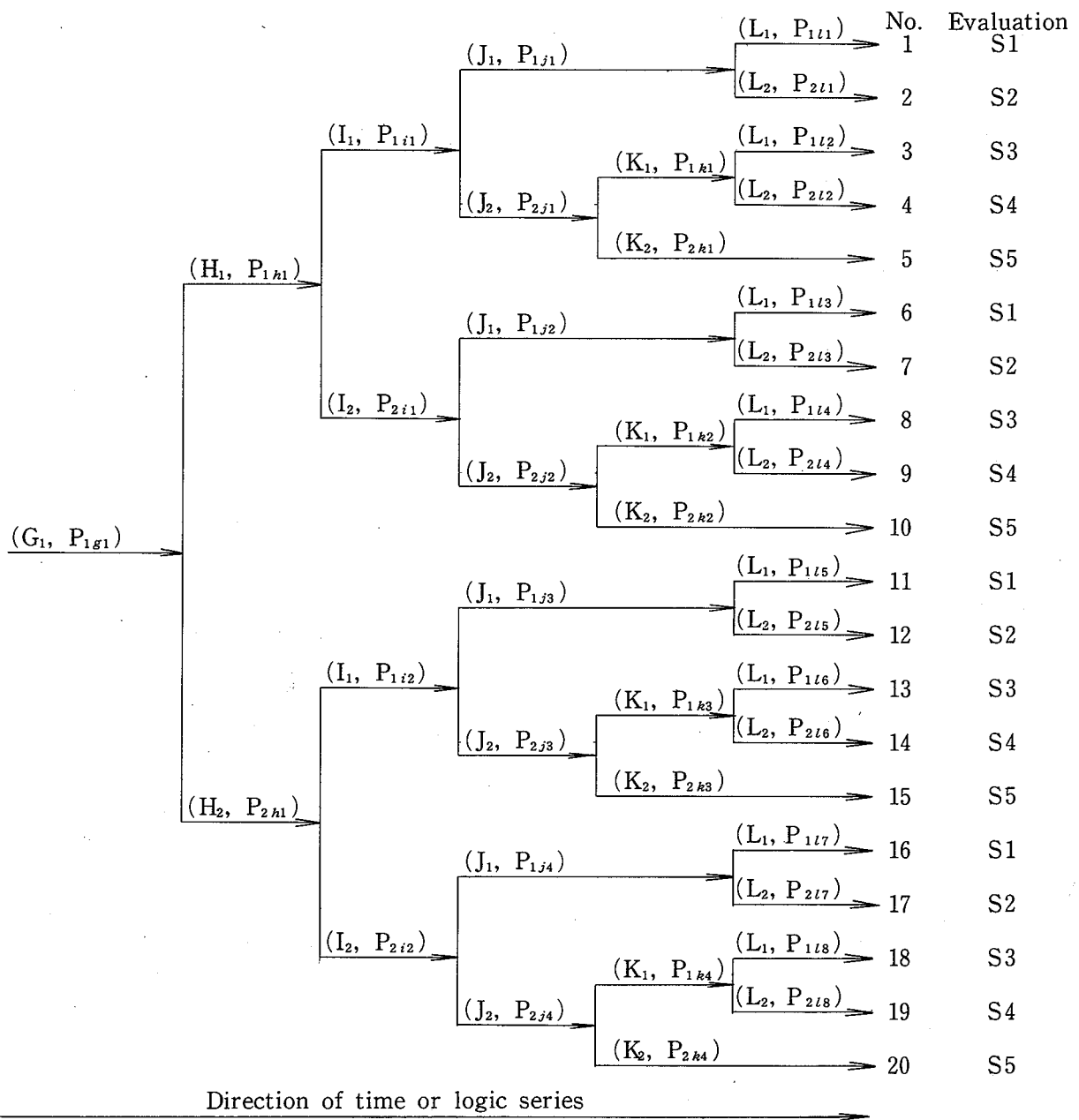
このような目的機能の異常が起りにくいほど, システムの信頼性は高くなる。

システムの信頼性を高めるには, その構成要素の信

頼性を向上させる事と, 要素の組合せによって向上を図る事が必要である。具体的には機能に冗長性を持たせる事, 異常検出機能の設置による警報や遮断,<sup>\*13</sup> 早い情報と速い対処, 予備機能変換の自動化, 人員の教

\*12 この関係を Table.5-8 に示す。

\*13 この様なものは, コンプレッサーの断水リレー, 温度警報器, 断油リレー, 送気管の温度警報器, CO 検出警報器, 酸素濃度警報器などが考えられる。



$G_1$  : A part of function is fallen into malfunction.

$H_1$  : Member in charge notices the malfunction.

$H_2$  : Nobody notices.

$I_1$  : Function for emergency work on.

$I_2$  : Function for emergency doesn't work.

$J_1$  : S.O.F. is continued.

$J_2$  : S.O.F. isn't continued.

$K_1$  : S.O.F. is recovered rapidly.

$K_2$  : S.O.F. isn't recovered rapidly.

$L_1$  : Malfunction is recovered rapidly.

$L_2$  : Malfunction isn't recovered rapidly.

$P_{xyz}$  is the probability that the event  $G \sim L$  will occur. ( $x=1,2$   $y=g,h,\dots,1$   $z=1,2,\dots,8$ )

Fig.5-5 Evaluation Map of Man-Machine System Reliability

人間-機械系の信頼性評価図



Table 5-8 System's failure mode and effect.

システムの使命を阻害するモードと効果

使 命	阻 害 モード	原 因	予 想 さ れ る 効果
1.作業室等の空気の消費に対して、圧縮空気の送給により適当な気圧で満たす。	1.低圧にする	1.圧縮空気製造機能の異常 2.圧縮空気移送機能の異常 3.圧縮空気調節機能の異常 4.運営機能の失敗	1.ケーソンの異常沈下 2.作業室内の異常出水 3.高気圧障害の誘因 4.酸素欠乏 5.有毒ガスや爆発発生ガスの作業室内への浸入
	2.高圧にする	1.圧縮空気調節機能の異常 2.運営機能の失敗	1.高気圧障害の誘因 2.構造物の破壊による空気洩れ
2.適当な質の空気によって満たす	1.油が含まれる	1.圧縮空気調節機能の異常 2.運営機能の失敗	1.衛生条件の悪化 2.燃焼や爆発の危険性
	2.有毒ガスが含まれる	1.圧縮空気製造機能の異常 2.圧縮空気調節機能の異常 3.運営機能の失敗	1.中毒災害の発生

育訓練による操作、修理、保守点検機能の向上、情報伝達の完全化などであり、また環境の整備による外乱からの影響を無くする事である。

当事者が、このような、システムの信頼性向上を目標論む時、その計画が、どの程度この向上に寄与するかを評価する事は重要である。それは、どの部分に設備の費用をかけるべきか、また人員の配置をどのようにすべきかの目標になるからである。

### 5.5.1 目的機能の阻害の定義

圧縮空気製造機能…圧縮空気を供給する必要がある時に、適当な圧縮空気を製造しない。

圧縮空気移送機能…機能する必要がある時に、当機能が阻害される。

圧縮空気調節機能…圧縮空気製造機能、移送機能いずれも機能しているが、当機能が阻害される。

システム運営機能…構成している下位機能のいずれかが阻害され、システムの使命が阻害される。

### 5.5.2 目的機能の信頼性評価の規準

この「人間-機械システム」である送気システムにおいて、ある下位機能が不調になり始めて、それが進行して、しだいに上位機能を阻害し、目的機能の阻害、システムの機能の停止に至るが、この過程は人間と装置との関係のなかで展開される。

今この過程において目的機能が受ける影響の程度に

応じて、その機能に対する信頼性低下の評価を行うこととし、その評価を次の5つに段階づけた。

S<sub>1</sub>: システムの目的機能を止める事なく、すぐに不調の部分の元の状態に修正できる。

S<sub>2</sub>: 予備機能や応急処置を用いて、システムの目的機能は止めずにすむが、不調の部分の回復に時間がかかる。

S<sub>3</sub>: システムの目的機能を一時停止するが、それを短時間<sup>\*14</sup>で回復する事ができ、不調の部分の修正をすぐに修正する事ができる。

S<sub>4</sub>: システムの目的機能を止めるが、予備装置や応急処理によって、その機能の回復が速い。しかし、不調の部分の修正に時間がかかる。

S<sub>5</sub>: 不調の原因に対し、それを修正する事も、補償する事もできず、長時間<sup>\*15</sup>システムの目的機能が停止する。

### 5.5.3 人間-機械系の信頼性評価図

{G<sub>1</sub>: ある機能に不調が生じ} → {H<sub>x</sub>: 係員が気づくかどうか} → {I<sub>x</sub>: 非常用機器が動くかどうか} → {J<sub>x</sub>: システムの目的機能が継続するかどうか} → {K<sub>x</sub>: システムの目的機能がすぐに回復されるかどうか} → {L<sub>x</sub>: 不調部分がすぐに修正されるかどうか}

{x=1 肯定, x=2 否定}

\*14 システム使用の阻害が、それほどひどくならない程度。

\*15 システム使命の阻害がひどくなる程度。

の系列事象の一種の確率樹木\*16を、「人間-機械系の信頼性評価図」としてFig.5-5に示す。

### 5.5.4 人間-機械系の信頼性評価図における各事象の発生確率の定義

系列事象中の、ある事象  $\Lambda_x$  ( $\Lambda_x = H_x \cdots L_x$ ) において、 $\Lambda_1$  と  $\Lambda_2$  とは排反であり、かつ

$$\sum_{x=1}^2 P_r \{ \Lambda_x \} = 1 \quad (5-1)^{*17}$$

であるとする。

さて、Fig.5-5 において、(x, y, z) を径路上の位置を示す記号とし、(x, y, z) における  $\Lambda_x$  の発生確率を  $P_{xyz}$  とすると ( $x=1, 2, y=h \cdots l, z=1, 2, \cdots 8$ )、この確率は、その事象の発生に至る各径路上の事象が全て生起するという条件下の条件つき確率である。

$$P_{xyz} = P_r \{ \Lambda_x | G_1 \cap H_x \cap \cdots \cap \Lambda'_x \} \quad (5-2)^{*18}$$

ただし、 $\Lambda'_x$  は  $\Lambda_x$  の1つ手前の事象とし、 $x', \cdots, x''$  はそれぞれ1又は2とする。

(5-2)式より

$$\sum_{x=1}^2 P_{xyz} = P_r \{ \Lambda_1 | G_1 \cap H_x \cap \cdots \cap \Lambda'_x \} + P_r \{ \Lambda_2 | G_1 \cap H_x \cap \cdots \cap \Lambda'_x \} \quad (5-3)^{*19}$$

仮定より  $\Lambda_1$  と  $\Lambda_2$  とは排反であるから

$$\text{右辺} = P_r \{ \Lambda_1 \cup \Lambda_2 | G_1 \cap H_x \cap \cdots \cap \Lambda'_x \}$$

(5-1)式より  $\Lambda_1 \cup \Lambda_2 = \Omega$

$\Omega$  は全事象である。従って、

$$\sum_{x=1}^2 P_{xyz} = P_r \{ \Omega | G_1 \cap H_x \cap \cdots \cap \Lambda'_x \} = 1$$

ただし、 $G_1 \cap H_x \cap \cdots \cap \Lambda'_x \neq \phi$  \*20 とする。

また、 $G_1 \cap H_x \cap \cdots \cap \Lambda'_x = \phi$

のときは、

$$\sum_{x=1}^2 P_{xyz} = 0 \quad \text{とする。}$$

従って、

$$\sum_{x=1}^2 P_{xyz} = 1 \quad \text{のとき}$$

$P_{2yz} = 1 - P_{1yz}$  となるので、簡単化のために、 $P_{1yz}$  を単に  $P_{yz}$  と表記し、 $P_{2yz}$  を  $1 - P_{yz}$  と表記する事とする。

$$P_{1yz} \stackrel{\text{def}}{=} P_{yz}$$

$$P_{2yz} \stackrel{\text{def}}{=} 1 - P_{yz}$$

なお、Fig.5-5において、

時間、あるいは論理的順序は矢印の方向に経過するものとしているので、事象  $\Lambda_x$  (例えば  $J_2$ ) の発生確率は、その事象がどの系列に含まれるかによって異なるものとなる。

今系列の終点につけられた番号をその系列の番号とし、その系列上の全事象が出現する確率、即ち「始点から順次に各事象が出現し最終的に終点の事象が出現した」と言う状態になる確率を、

$$P_n \quad (n=1, 2, \cdots 20)$$

とすると、これは、その系列上の、各事象の積事象として表現される。

$P_n = P_r \{ G_1 \cap H_x \cap \cdots \cap L_{x''} \}$  ( $L_{x''}$  のない所は  $K_{x''}$  まで)

$$= P_r \{ G_1 \} \cdot P_r \{ H_x | G_1 \} \cdot P_r \{ L_{x'} | G_1 \cap H_x \} \cdots P_r \{ L_{x''} | G_1 \cap H_x \cap \cdots \cap K_{x''} \} \quad (5-4)^{*21}$$

$$\text{また、} \quad \sum_{n=1}^{20} P_n = P_r \{ G_1 \} \quad (5-5)$$

なる性質がある事は容易にわかる。

さて系列の終点の状態は、信頼性評価基準  $S_\mu$  ( $\mu=1, 2, \cdots 5$ ) のいずれかに当て嵌めることができるので、これを行えば、事象  $G_1$  が生じたとき、目的機能の信頼性評価が  $S_\mu$  になる確率を知る事ができるわけである。

このようにして、考えられるあらゆる事象を、 $G_1$  に入力して、予想される結果を総合する事により、この送気システム全体の信頼性を検討する事ができる\*22

また、この「人間-機械系評価図」は、警報器や非常装置などが、組み込まれている場合と、そうでない場合との信頼性を比較する上で便利にできている。

Fig.5-5は、各経路のカテゴリーを、2分法で描いているが、これを多分法に分解してもよいし、理論上はどこまでも細分できる。この場合、各カテゴリーは、排反である事と、(5-1)式を満足する事が必要である。

\*16 または確率枝図 (probability tree) これを安全科学の分野では決定樹 (decision tree) ないし関連樹 (event tree) などと呼んでいる。

\*17 これは  $\Lambda_1 \cap \Lambda_2 = \phi$  かつ、 $\Lambda_1 \cup \Lambda_2 = \Omega$  と表現できる。

\*18 右辺は、「 $G_1, H_x, \cdots, \Lambda'_x$  が生じた条件での  $\Lambda_x$  の生ずる条件つき確率である。一般的に言えば、 $P_{xyz}$  は履歴性を持った確率過程であると定義できる。

\*19 式の形からも自明のように、この  $\Lambda_1$  と  $\Lambda_2$  は図5-5において上から順に対になった組内のものであり、以下の性質もその組の内部について述べている事に注意されたい。

\*20  $\phi$  は空事象。

\*21  $P_n = \prod_{x,y,z} P_{xyz}$  ( $x, y, z$  は通過径路上の記号を全てとる。)とも書ける。

\*22 事象と目的機能に関する総合である。目的機能の阻害とシステムの使命の阻害との関係はTable 5-8を参照されたい。

この分け方は、得られる信頼性のデータの性質と、評価の性格によって決められる。

## 5.6 解析例について

各事象の発生確率は、いろいろな研究のデータを、利用できる場合もあるが、また不十分な面が多い。

従って、当事者は、これ等のデータや周囲の経験を参考にして、各事象が発生するためのF.T.A.などによる確率計算を行い、各事象の発生確率を検討しなければならない。この時、主観的要素が入ってくるのは、ある程度避け難いものである。

(1) 貯水槽のフロートスイッチによる警報機能が目的機能<sup>\*23</sup>に与える効果の検討

河川や井戸より冷却水を摂取し、その水は再利用しないシステムにおいて、今Table 5-3のような原因によって、水源から貯水槽に至る径路に不調が生じ、送水減少あるいは停止が起り、冷却機能に消費される水量よりも、貯水槽に送給される水量が小さくなった場合を考える。このままであると冷却機能が阻害されることになるが、システムの機能の働きによってどのような結果になるかを検討する事とする。

この際システムの条件として、(a) 貯水槽に水位減少を知らせるフロートスイッチが設置してある。(b) フロートスイッチはない、の二通りの場合<sup>\*24</sup>について考察し、フロートスイッチの効果を調べる事とする。

(a)

警報器がコンプレッサー室に在るとする。<sup>\*25</sup>係員が警報によって気づく確率 $P_{h1}^a$ は、係員が警報を聞く事のできる状態にある確率 $P_{h1}^n$ と、警報器が故障していない確率 $P_{h1}^m$ とを乗じたものと、<sup>\*26</sup>係員が警報によって気づかなかった時に、偶然、当事者によって発見される確率<sup>\*27</sup> $P_{h1}^o$ を加えたものである。また偶然、当事者が気づく確率を $P_{h1}^o$ とすれば、

$$P_{h1}^a = P_{h1}^n \cdot P_{h1}^m + P_{h1}^o \quad *28$$

$$= P_{h1}^n \cdot P_{h1}^m + (1 - P_{h1}^n \cdot P_{h1}^m) \cdot P_{h1}^o \quad *29$$

$$\text{今 } P_{h1}^n = 0.999, P_{h1}^m = 0.95 \quad *30$$

$$P_{h1}^o = 0.01 \quad *31 \text{ とすると,}$$

$$P_{h1}^a = 0.95 \text{ となる。}$$

送水回路を自動的に切り換えるような非常用装置がないので<sup>\*32</sup>

$$P_{i1}^a = P_{i2}^a = P_{i1}^b = P_{i2}^b = 0 \quad *33 \text{ とする。}$$

電動コンプレッサーが、断水によって停止する前に、

不調の部分の修正が可能か、または、冷却水を必要としない、エンジンコンプレッサーの稼動に成功するかは、貯水槽の大きさと、単位時間当りの消費量との関係による。このシステムでは十分に大きな貯水槽を設置してあるものとする。断水リレー等により、コンプレッサーが停止する前に、不調の機能が修正できる<sup>\*34</sup>確率を、 $P_{j2}^c$ とし、エンジンコンプレッサーの手際よい稼動に成功する確率を $P_{j2}^d$ とするならば、

$$P_{j2}^e = P_{j2}^c + (1 - P_{j2}^c) P_{j2}^d \text{ となり } *35 *36$$

$$P_{j2}^c = 0.5 \quad P_{j2}^d = 0.9 \text{ とすると}$$

$$P_{j2}^e = 0.95$$

不調の部分が修理や部品の交換によって、あまり時間がかからない<sup>\*37</sup>で回復される確率を

$$P_{k3}^a = 0.9$$

$$P_{k4}^a = 0.9$$

とする。

電動コンプレッサーを止める前に、エンジンコンプレッサーを稼動させる事ができなかった場合は、圧縮空気製造機能が止まる。不手際で、エンジンコンプレッサーをすぐには稼動できなかったが、システムの使命の阻害がひどくならないうちに、稼動に成功する確率を $P_{k2}^i$ とすると、目的機能の早期回復の確率 $P_{k2}^j$ は

$$P_{k2}^j = P_{k2}^i + (1 - P_{k2}^i) P_{k3}^a$$

$$P_{k2}^i = 0.5 \text{ とすると}$$

$$P_{k2}^j = 0.95$$

一方、気づかない確率は $(1 - P_{h1}^a) = 0.05$ で、これは、ほぼ係員が適当な場所にいない確率と考えてよい。この場合、断水リレーや温度リレーあるいは故障などによってコンプレッサーは止まるので、

$$P_{i4}^a = 0$$

\*23 ここでは、圧縮空気製造機能の事であり、この他に、少くとも圧縮空気調節機能にも影響を与える。

\*24 他の条件は同じとする。

\*25 複数の場所に在った方がよい。

\*26  $P_{h1}^n$ と $P_{h1}^m$ と $P_{h1}^o$ とは、互に独立であるとする。

\*27 フロートスイッチが作動する前後の水位での発見とする。

\*28 (a)の場合の $P_{h1}$ を $P_{h1}^a$ と書く事とする。

\*29 第2項は0.0005となり、第1項と比較して無視できる程小さい。

\*30 所用で出ている場合や、深い睡眠にある場合などがある。

\*31 昼夜平均して、100分に1回、1分間の見廻りを期待している。

\*32 ポンプなどの故障に対しては、予備ポンプへの負荷をマグネットスイッチでの自動切り換えの方法など考えられる。

\*33 (b)の場合の $P_{j2}$ を $P_{j2}^c$ と書く事とする。

\*34 予備機能への切り換えや、不調の部分の修理による。

\*35 簡単に修正できる不調は、コンプレッサーを稼動したまま、すぐに修復してしまうし、修正に時間がかかる場合は同様に、エンジンコンプレッサーを稼動させるであろう。この判断と操作に要する時間と貯水量との関係は予測が可能である。

\*36  $P_{j2}^c$ と $P_{j2}^d$ とは互に独立であるとする。

\*37 2次故障が発生するに十分な時間を与えない長さ。

圧縮空気の消費量とレシーバータンクの容量との関係によって決まる、圧縮空気製造機能の許容停止時間を、コンプレッサーが停止した事に気づいてから、冷却機能の回復による電動コンプレッサーの再稼働や、エンジンコンプレッサーの稼働までの停止時間が、超過しない確率を  $P'_{j4}$  とする。

コンプレッサーが停止した事に気づく確率を  $P''_{j4}$

$$P''_{j4} = P'_{j4} \cdot P''_{j4}$$

$$P'_{j4} = 0.5 \quad P''_{j4} = 0.9 \quad \text{とすると,}$$

$$P''_{j4} = 0.45$$

また,  $P''_{f8} = 0.9$  とする。

Fig.5-5より

$$P_1^a = P_2^a = \dots = P_5^a = 0$$

$$P_6^a = 0.812P_{g1}$$

$$P_7^a = 0.090P_{g1}$$

$$P_8^a = 0.041P_{g1}$$

$$P_9^a = 0.005P_{g1}$$

$$P_{10}^a = 0.002P_{g1}$$

$$P_{11}^a = P_{12}^a = \dots = P_{17}^a = 0$$

$$P_{18}^a = 0.020P_{g1}$$

$$P_{19}^a = 0.002P_{g1}$$

$$P_{20}^a = 0.028P_{g1} \quad \text{となり}$$

$$P_r \{S_5^a\} = P_{10}^a + P_{20}^a = 0.030P_{g1}$$

$$P_r \{S_4^a\} = P_9^a + P_{19}^a = 0.007P_{g1}$$

$$P_r \{S_3^a\} = P_8^a + P_{18}^a = 0.061P_{g1}$$

$$P_r \{S_2^a\} = 0.090P_{g1}$$

$$P_r \{S_1^a\} = 0.812P_{g1} \quad \text{となる。}$$

(b)

係員がコンプレッサーの断水警報器によって気づく確率は(a)と同様に。

$$P_{k1}^b = 0.95^{*38}$$

$$P_{k2}^b = P_{k3}^b = 0$$

断水警報器が作動した時点から、不調機能の回復や、エンジンコンプレッサーの稼働に要する時間は、電動コンプレッサーを停止させずにすむ時間を、ほとんど越えるため、ほぼ、

$$P_{k2}^b = 0$$

同様に以下  $P_{k4}^b = 0$

$$P_{k2}^b = 0.6$$

$$P_{k4}^b = 0.9$$

$$P_{k4}^b = 0.45$$

$$P_{k8}^b = 0.9$$

とすると、

$$P_{k1}^b = P_{k2}^b = \dots = P_{k7}^b = 0$$

$$P_{k8}^b = 0.513P_{g1}$$

$$P_{k9}^b = 0.057P_{g1}$$

$$P_{k10}^b = 0.380P_{g1}$$

$$P_{k11}^b = P_{k12}^b = \dots = P_{k17}^b = 0$$

$$P_{k18}^b = 0.020P_{g1}$$

$$P_{k19}^b = 0.002P_{g1}$$

$$P_{k20}^b = 0.028P_{g1}$$

従って、

$$P_r \{S_5\} = P_{k10}^b + P_{k20}^b = 0.408P_{g1}$$

$$P_r \{S_4\} = P_{k9}^b + P_{k19}^b = 0.059P_{g1}$$

$$P_r \{S_3\} = P_{k8}^b + P_{k18}^b = 0.533P_{g1}$$

$$P_r \{S_2\} = P_r \{S_1\} = 0$$

(a)と(b)を比較すると  $S_5$  になる確率は、この  $G_1$  事象に対して、(a)の方が約1/14に減少する事となり、 $S_4$  については、約1/8に減少する。

今、 $G_1$  事象の発生確率を

$$P_{g1} = 10^{-4} \text{ [回/hour] とすると}$$

この不調により、システムの使命が阻害される程、圧縮空気製造機能の停止する事態の発生確率は、

$$(a) \quad P_r \{S_5^a\} = 3 \times 10^{-6} \text{ [回/hour]}$$

$$(b) \quad P_r \{S_5^b\} = 4.1 \times 10^{-5} \text{ [回/hour]}$$

となる。

(2) コンプレッサーの断水警報リレーが、空気温度調節機能と混入物分離機能すなわち、圧縮空気調節機能の信頼性に与える効果の検討

冷却機能の不調により、冷却水の循環が停止してしまった。このままであると、コンプレッサーが停止するが、停止しない場合は過熱をする。また同じ冷却機能によって、アフタークーラーが機能しているので、コンプレッサーが稼働している場合、圧縮空気の冷却ができなくなり、混入油分の分離もできなくなる。

そのような事態に対処するために、断水時に警報を発し、その後タイマーによって、リレースイッチが働き、コンプレッサーが停止する機構がある。この装置が、(a) ある場合 (b) ない場合、とについて、上記機能<sup>\*39</sup>についての信頼性を検討する事とする。

(a)

警報装置が故障していない確率を  $q_{k1}^a$ 、係員が警報に気づく状態にある確率を  $q_{k1}^a$ 、係員が警報によって気づく

\*38 断水警報器がない時はこの値はもっと小さくなる。

\*39 圧縮空気調節機能の他に少なくとも圧縮空気製造機能が影響を受ける。

かなかった時に、偶然、当事者によって発見される確率を  $q''_{h1}$  とする。また、偶然、当事者が気づく確率を  $q'''_{h1}$  とすると、

$$P^a_{h1} = q'_{h1} \cdot q''_{h1} + q'''_{h1} \quad *40$$

$$= q'_{h1} \cdot q''_{h1} + (1 - q'_{h1} \cdot q''_{h1}) q'''_{h1} \quad *41$$

$$q'_{h1} = 0.9999 \quad q''_{h1} = 0.94$$

$$q'''_{h1} = 0.01 \quad \text{とすると}$$

$$P^a_{h1} = 0.95$$

気づいた係員は、連絡や、エンジンコンプレッサーの始動、あるいは冷却機能修正の行動を起す。そしてコンプレッサーは、断水リレーによって停止させられる。この確率を  $q'_{i1}$  とすれば、これにより、上記機能は阻害されないから \*42

$$P^a_{i1} = q'_{i1} \quad P^a_{j1} = 1$$

$$q'_{i1} = 0.9999 \quad \text{とすれば、}$$

$$P^a_{i1} = 0.9999$$

不調部分の修正が、すみやかに行われる確率を

$$P^a_{i1} = 0.5$$

一方、係員が気づいていて、断水リレーが故障した場合に、係員によって止められる確率を  $q'_{j2}$  とすると上記機能が阻害されない確率  $P^a_{j2}$  は

$$P^a_{j2} = q'_{j2}$$

$$q'_{j2} = 0.99 \quad \text{とすれば}$$

$$P^a_{j2} = 0.99$$

また、  $P^a_{i3} = P^a_{i4} = 0.5$  とし、

少し、上記機能が阻害され始めたが、すぐ当事者によって気づかれて、電動コンプレッサーの停止や、冷却機能の回復により、早急に、上記機能が阻害から解放される確率を

$$P^a_{k2} = 0.99$$

次に、係員が気づかないのは、係員がいない確率とほぼ等しく、係員がいない場合でも、断水リレーの作動確率は等しいと考えられるので、

$$P^a_{i2} = 0.9999$$

リレーが成功するという事は、コンプレッサーが停止をする事と考えて、

$$P^a_{j3} = 1$$

コンプレッサーが止って、気づいて、あわてて不調部分の修正が行なわれる確率

$$P^a_{i5} = 0.1$$

リレーの故障によって、止まらず、係員もいないから、上記機能は阻害し始められる。

$$P^a_{j4} = 0$$

その状態 \*43は、コンプレッサーが偶然に止まるか、温度警報器などによって、だれかが早く気づいて止めるまで続く場合

$$P^a_{k4} = 0.5$$

と、だれも気づかず、コンプレッサーが故障するまでなど、かなり長く続く場合とがある。気づいてすぐに修正される確率  $P^a_{i8} = 0.05$  とする。

(b)

Fig.5-6のように、係員が気づく確率を

$$P^b_{h1} = 0.76$$

断水リレーがないので、

$$P^b_{i1} = P^b_{j2} = 0$$

コンプレッサー停止のヒューマンエラーの確率を  $q'_{j2}$  とすれば、

$$P^b_{j2} = 1 - q'_{j2}$$

$$q'_{j2} = 0.01 \quad \text{とすると、}$$

$$P^b_{j2} = 0.99$$

そのエラーの修正の確率を、  $q'_{k2}$  とすると

$$P^b_{k2} = q'_{k2}$$

$$q'_{k2} = 0.99 \quad \text{ならば、}$$

$$P^b_{k2} = 0.99$$

また、  $P^b_{i3} = P^b_{i4} = 0.5$  とする。

他方、気づかなかった場合は、上記機能が阻害しはじめられ、

$$P^b_{j4} = 0$$

温度警報器などによって、だれかが早く気づいて、停止させるか、コンプレッサーが偶然早く止まるなどの事によって、上記機能の阻害が取り除かれる確率を

$$P^b_{k4} = 0.5 \quad *44$$

また、  $P^b_{i8} = 0.05$

とする。

以上の仮定から (a) と (b) を比較すると、

$$P_r \{S^a_i\} = 2.5 \times 10^{-6} P_{g1} \quad P_r \{S^b_i\} = 0.120 P_{g1}$$

$$P_r \{S^a_j\} = 2.8 \times 10^{-6} P_{g1} \quad P_r \{S^b_j\} = 0.118 P_{g1}$$

$$P_r \{S^a_k\} = 6.0 \times 10^{-7} P_{g1} \quad P_r \{S^b_k\} = 0.010 P_{g1}$$

$$P_r \{S^a_l\} = 0.519 P_{g1} \quad P_r \{S^b_l\} = 0.376 P_{g1}$$

$$P_r \{S^a_m\} = 0.480 P_{g1} \quad P_r \{S^b_m\} = 0.376 P_{g1}$$

\*40  $q'_{h1}$  と  $q''_{h1}$  と  $q'''_{h1}$  とは互に独立であるとしている。

\*41 2項目は、小さいので無視できる。

\*42 圧縮空気が製造されないから温度を調節する必要がない。機能する必要がある時に、機能しなかった時、機能が阻害されている。そしてこの場合は圧縮空気製造機能が阻害されていると定義されている。機能の阻害の定義を参照。

\*43 温度リレーはないものとする。

\*44 温度警報器がない場合は、この値は著しく小さくなるであろう。

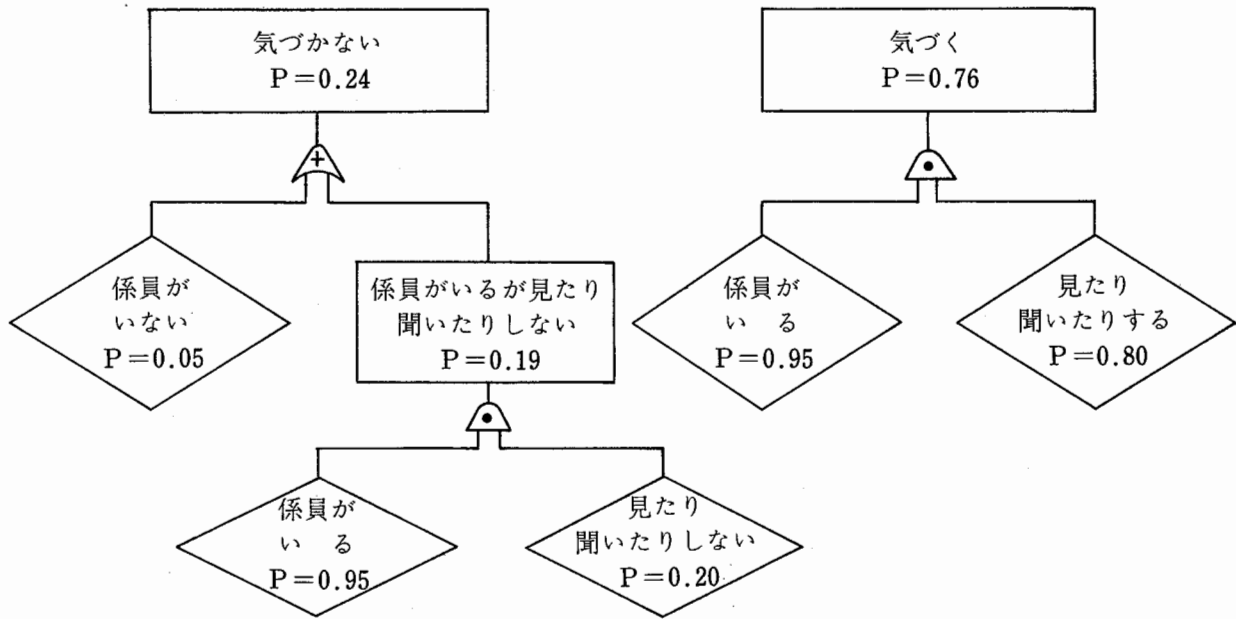


Fig.5-6 F.T.of “Being noticed or not”  
「気づくか気づかないか」のフォールトツリー

この場合、 $S_5$ に関して、(a)は(b)に対して、 $1/(4.8 \times 10^4)$  倍の確率でしかならない事になる。

実際の  $G_1$  の発生確率を

$$P_{G1} = 4.2 \times 10^{-4} \text{ [回/hour]}$$

とすると、

$$Pr\{S_5^a\} = 1.1 \times 10^{-9} \text{ [回/hour]}$$

$$Pr\{S_5^b\} = 5.0 \times 10^{-5} \text{ [回/hour]}$$

である。

### 5.7 気閘室における減圧時の温度低下について

潜函より退出する場合、作業者は函内圧力と作業時間によって定まる適当な減圧処置を、気閘室において、受けなければならない。

この時、気閘室から排気による減圧を行うので、普通気閘室の気温は低下する。この気温の低下は、冬季の低温時などに、作業者に対して次のような影響を与える。

- (i) 生理的效果……空気圧障害\*45が発生しやすい条件を与える。
- (ii) 心理的效果\*46……減圧時間を省略短縮させる動機を与える。

以上の他に、安全上不満足な暖房方法が取られる心

配もあるわけである。

そこで実際の現場において、気閘室の減圧時の温度変化を測定し、温度低下の実態を把握し、その問題の対処方法について検討をする。

#### 5.7.1 気閘室の温度低下の現場測定

バッテリー駆動の温度測定記録計と、圧力測定記録計を、気閘室内に設置し、外部よりいろいろと減圧速度と、減圧量を変え、温度低下との関係を得た。

これ等の測定データのうち、減圧前の圧力  $P_1$ 、減圧後の圧力  $P_2$ 、減圧の平均速度、減圧前の温度  $T_1$  および減圧による温度低下  $(T_2 - T_1)$  について、Table 5-9 に示す。

この排気による気閘室の中の空気の膨張状態を支配する要因は、

- 排気条件 (動的過程) — 排気速度、排気弁の構造  
気閘室の形状、その他
- 伝熱条件 — 気閘室内の伝熱条件、気閘室と外部との伝熱条件 (熱伝導率、外気温、風速、直射日光の程度) 内部の熱源など。
- 相の変化 — 水蒸気の飽和液化、その他

\*45 高気圧障害を防ぐにはむしろ発汗があるほどの方がよいとされている。極端な場合にはくしゃみによって肺臓が破裂した例もあった。

\*46 居住性が悪いからである。

Table.5-9 Temperature drop at the decompressing in decompression Chambers.

気閘室における減圧時の温度低下

Atmospheric temperature(°C)	Data No.	Decompression P <sub>1</sub> ~P <sub>2</sub> (atm)	Decompression velocity (atm/min)	Initial temperature (°C)	Drop of temperature (°C)
A job site 25.5 } 27.0	1	3.00~1.00	2.40	36.7	21.1
	2	3.00~1.80	0.29	34.4	12.2
	3	1.80~1.52	0.17	27.8	3.3
	4	1.52~1.23	0.17	27.8	3.3
	5	1.25~1.00	0.17	27.7	3.3
	6	3.10~1.10	3.00	34.4	10.0
	7	2.20~1.50	4.20	27.8	4.5
	8	1.49~1.00	1.47	27.8	5.0
	9	2.60~1.00	2.74	31.7	15.0
B job site 14.5	1	2.65~1.00	1.10	20.0	22.2
	2	2.60~1.60	0.35	28.0	21.3
	3	1.60~1.30	0.51	14.0	4.3
	4	1.32~1.00	0.43	10.2	4.2
	5	2.60~1.60	0.55	20.0	14.7
	6	1.60~1.30	0.42	16.6	6.0
	7	1.32~1.00	0.64	14.3	6.0
	8	2.70~1.55	0.97	21.0	15.6
	9	1.53~1.23	0.60	16.0	4.6
C job site 3.5	1	2.52~1.38	0.35	15.5	14.9
	2	1.43~1.18	0.25	10.8	4.8
	3	1.15~1.06	0.07	9.0	4.0
	4	2.50~1.57	0.80	14.0	17.0
	5	1.42~1.20	0.66	7.5	4.5
	6	1.23~1.00	0.40	6.0	5.0
	7	2.50~1.38	0.75	17.2	15.0
	8	1.42~1.20	0.38	14.0	5.2
	9	1.33~1.09	0.36	12.0	5.0

どがあり、現実における変化は、それ等の要因がいろいろと作用し合ったものになる。

そこで実際の測定値を、ポリトロブ変化

$$Pv^n = \text{const}$$

近似した場合の n の値を検討した。

P : 圧力 [kg/m<sup>2</sup>] v : 比容積 [m<sup>3</sup>/kg] T : 温度 [°K] V : 気閘室内の体積 [m<sup>3</sup>] G : 気閘室中の気体重量 [kg] R : ガス定数(近似的に一定とする。)

仮定より気閘室内の変化は、 $P_1 v_1^n = P_2 v_2^n$  \*47

状態式  $v_1/v_2 = P_2 T_1 / P_1 T_2$  を代入して、

$$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{\frac{n-1}{n}}$$

また、 $T_2 - T_1 = T_1 \{T_2/T_1 - 1\}$  なので、

$$(T_2 - T_1)/T_1 = \{(P_2/P_1)^{\frac{n-1}{n}} - 1\} \quad (5-6)$$

これより、温度変化と圧力変化の測定値に対する。n の関係を Fig.5-7 に示す。

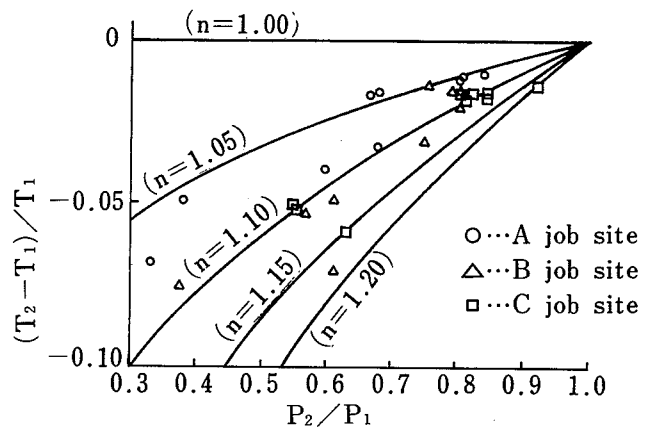


Fig.5-7 Relationship between change of air pressure and that of temperature in air locks

気閘室における圧力変化と温度変化の関係

### 5.7.2 暖房に必要な熱量についての検討

温度低下を少なくするためには、気閘室内を暖房する事が必要である。気閘室減圧を一定速度で行う場合に、どの程度の熱量を加える必要があるかを考察する事は興味のある事である。

減圧を開始する前に、あらかじめ温度をある程度上昇させておくのもよい方法であるが、ここでは減圧による温度低下\*48を無効にする熱量について検討する。すなわち減圧中気閘室の温度は変化する事なく、圧力のみ変化するような方法である。

ごくマクロ的に考え、気閘室内は温度 T [°K] の等温変化をするとみなすことにする。

U : 気閘室内部の内部エネルギー [kcal]

Q : 加えられる熱量 [kcal]

P, V, v, T, G, R : 前項と同じ

h : 放出空気の単位重量当りのエンタルピー [kcal]

t : 時間 [sec]

\*47 サフィックス 1 は減圧前、2 は減圧後を示す。

\*48 熱伝達による熱量を別にしておく。

u : 単位重量当りの内部エネルギー [kcal/kg]  
 今  $\delta t$  時間の系の変化に対する第1法則を記述すると、

$$\frac{\partial U}{\partial t} \delta t = \frac{\partial Q}{\partial t} \delta t + h \frac{\partial G}{\partial t} \delta t \quad (5-7)$$

$$\text{または, } \frac{\partial Gu}{\partial t} \delta t = \frac{\partial Q}{\partial t} \delta t + h \frac{\partial G}{\partial t} \delta t \quad (5-7)'$$

温度一定のとき、u と h の圧力による変化は小さいので、一定で近似し、式(5-7)' を積分して  $h = u + ART$  を代入すると

$$(G_2 - G_1)u = Q_{12} + (u + ART)(G_2 - G_1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}, \frac{\partial Q}{\partial t}, \frac{\partial G}{\partial t} \text{ は系が増加または、加えられる}$$

方向を正とする。

整理すると

$$Q_{12} = ART(G_1 - G_2) \quad (5-8)$$

書き直すと

$$Q_{12} = AV(P_1 - P_2) \quad (5-8)'$$

ここでは A は、熱の仕事当量の逆数  $\frac{1}{427}$  [kcal/kgm]

式(5-7)' から u 一定条件で

$$\frac{u \partial G}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} + h \frac{\partial G}{\partial t} \quad (5-9)$$

又、 $PV = GRT$  において等温変化を考えているので、

$$V \frac{\partial P}{\partial t} = RT \frac{\partial G}{\partial t} \quad *49 \quad (5-10)$$

となり

(5-9)式を整理すると

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = (u - h) \frac{\partial G}{\partial t} \quad (5-9)'$$

故に(5-10)式と(5-9)'式より

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \text{const の等速減圧の時}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \text{const である。}$$

従って気筒室内の等速減圧による温度低下を防ぐには、単位時間当り一定の熱量を加えればよい。

今減圧速度  $0.8$  [kg/cm<sup>2</sup>分] で1分間減圧したとすると、

式(5-6)' より  $1$  [m<sup>3</sup>] 当り

$$Q_{12} = A(P_2 - P_1) = \frac{0.8}{427} \times 10^4 = 18.7 \text{ [kcal]}$$

となり1時間当りにすれば  $1124$  [kcal]  $1.3$  [kwh] の加熱が正味必要となる。

この他、減圧中の熱伝達による外部への熱損失を考慮に入れる事が、実際の暖房を設定するには必要である。<sup>\*50</sup>

実態調査の結果によると、シャフト数が3本以上のケーソンにおいては、必ず1本以上のいわゆるマン専用の気筒が設置してあったが、2本の場合は両方ともマン・マテリアル共用であった。

マン専用の場合是一部、暖房装置の設置してあるものがあつた。これは温水循環式であり、 $9$  [m<sup>3</sup>] の気筒室に対し、 $10$  [kw] のヒータを用いたもので、これを用いた温度測定はできなかったが、温水に蓄熱し、減圧時に集中的に熱の放散を行えば、非常に有効であると思われる。また、このタイプのもは、ロック内の火災などの時、給水タンク内の水を噴射する事ができるようになっていた。マン・マテリアル共用型においても、必要に応じて上記と同じような形式の暖房器を取付けられるものもあつた。

## 5.8 ま と め

5.6の解析例からもわかるように、安全装置は送気システムの場合でも、大きな信頼性向上の役割を果すと思われる。コンプレッサーなど比較的故障の多いものなどは、係員の熟達した運転技能はもとより、それをバックアップする、自動異常診断システムなどが組み込まれば理想的である。<sup>\*51</sup>このようなシステムは現在開発中であり、実用化も近いものと思われる。

またメンテナンスを確実にするためにも必要な台数を確保<sup>\*52</sup>するようしなければならない。

本報告では信頼性解析は1~2の具体例にとどまったが、今後さらに解析例の充実と、想定される危険性の解析を行う事によって送気システムと圧気作業の安全性評価の研究を完成させて行きたいと思っている。

\*49 Rも一定としている。

\*50 外気温との温度差が $25$  (°C)、外気面積 $24.7$  [m<sup>2</sup>]、体積 $9.4$  [m<sup>3</sup>] の気筒室の伝熱による外部への熱損失と、気筒室内の初期温度を上昇させるための熱量が約 $7000$  [kcal/時] という計算例があり、これは、 $8.12$  [kw h] に相当する。

\*51 平田欣吾、設備診断、異常予知システム概要、計測技術'76.9.71~76

\*52 このような問題を扱った最近の報告に「修理のある待機冗長システムに関する信頼性解析の応用例」熊谷道一、J. Operations Res. Soc. J, 21-1 (1978)



終りに本研究は調査や面談により貴重な資料や情報を入取したが、その際に多くの方々の御協力と御尽力をいただいた事を衷心から感謝するものである。

### 5.9 参考文献

- 1) 近藤太二, 災害分析における欠陥関連樹法の適用, 安全, No.1(1972)
- 2) 井上紘一, システムの信頼性および安全性解析, Journai of the J.S.M.E. Vol.79 No.686(1976)
- 3) 行待武生, Fault Tree Analysis と人間工学, 人間工学, Vol. 12, No.5(1976)  
人間工学, Vol. 13, No.2, Vol.13. No.6(1977)
- 4) FTAのはなし  
セイフティエンジニアリング, No.15(1977)
- 5) Malasky, S. W., System Safety, Spartar Books, Hayden Book Company. Inc.(1974)
- 6) FMEA/FMECAの解説  
日本科学技術連盟 (1973)
- 7) H.E. Lambert, Systems Safety Analysis and Fault Tree Analysis, Lawrence Livermore Laboratory (1973)
- 8) Willie Hammer, Handbook of System and Product Safety, Prentice-Hall, Inc.(1972)
- 9) W.G. Johnson, The Management Oversight and Risk Tree-MORT, SAN821-2, (1973)