論文報告

別子鉱山における通気改善および
坑内冷却について*

(昭和36年度 渡辺賞牌受賞)

正 会 員 天 野 勲 三**

Underground Air Conditioning at Bessi Mine

Kunzo AMANO

As for the plan of improving the meteorological condition in the hot underground, two methods are usually adopted; one is by means of increasing ventilation volume, and another is by cooling air artificially with the refrigerator. In the adoption of the former method, the relation between ventilation volume and the temperature of air current, the effect of wetness of rock surface, thermal conductivity of rocks, and radius of mine gallery on the temperature of air current come into question. And regarding the latter method, the setting place of the refrigerator or the cooler comes into question.

In this paper we discussed these problems citing some examples, and further set forth the cooling method using cool water. We noted down here that since these devices were brought in operation, the meteorological condition in Bessi Mine has been improved and prospects of success in the deep mining was realized.

1. 緒 言

別子鉱山は採鉱開始以来 270 年の歴史を持ち、現在までに粗鉱量 2,300 万 t、銅量 64 万 t を産出したわが国最大の銅山であるが、稼行年数の増加とともに採鉱切羽が深部に移行し、坑内気温が上昇したため、坑内冷却の問題が重要な研究課題となった。

暑い坑内の気象条件を改善する方法としては、通気量を増加する方法と、冷凍機などを使用して坑内を人工的な手段によって冷却する方法とが採用されている。これらの方法のうち前者では、通気量と気流温度との関係および岩盤壁面の濡れの状態、岩盤の熱伝導度、坑道半径などが気流温度にどのような影響をおよぼすかが問題となり、また後者では、冷凍機または空気冷却器の設置位置をどこにするかが問題となる。よつて本論文においてはこれらの問題について例題を設定して検討するとともに別子鉱山で実施した通気改善および冷水を利用した坑内冷却装置について述べる。

2. 通気量と気流温度との関係

通気量を増加すれば気流温度は低下し、風速の増加と相まって坑内気象条件が改善されることは経験上知られているが、坑内冷却の設計に当つては通気量を増加した場合、果してどの程度の温度降下が期待できるかを定量的に知ることが必要である。そこでこの問題を例題によ

つて検討しよう。

いま、立坑半径を 2.5m、岩壁の熱伝導度を $2.92 \text{ kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$ 立坑頂部の地熱温度を 30°C 、坑外空気の年間平均温度を 15°C 、水蒸気量を $9.0 \times 10^{-3} \text{ kg/kg}$ 、比重を 1.2 kg/m^3 と見積り、立坑は壁面全体が水で濡れているものと考えて、通気量が変化した場合の立坑底の気流温度および水蒸気量を計算すると¹⁾第 1 図および第 2 図のようになる。

第 1 図を見ると、気流が立坑を降下する場合には通気量を増加しても気流温度はあまり低下しないことがわかる。また従来立坑を気流が降下する場合には、空気の自己圧縮によつて 100m につき約 1°C の温度上昇があるといわれていたが、これは立坑壁面で熱交換が起らず、また水の状態変化も起らない場合のことである。実際の坑内で見られるように立坑壁面が水で濡れている場合には、立坑壁面で水蒸気の蒸発がおり、気流中の水蒸気

第 1 図 気流が立坑を降下する場合の通気量と温度との比較

* 昭和37年4月24日受理

** 工博 住友金属鉱山株式会社 別子鉱業所鉱務課長代理

第2図 気流が立坑を降下する場合の通気量と水蒸気量との関係

量が第2図に示すように増加するので、温度上昇はそれ程高くなく100mにつき0.4~0.5℃程度である。単位重量の気流中に含まれる水蒸気量は、第2図に示すように通気量を増加すると減少する。したがって立坑の場合でも通気量を増加すれば、気流温度は低下しないが湿度が減少する利点がある。

つぎに立坑の深さを1,120mとして、この立坑を降下した入気がさらに4,500mの長さの水平坑道を通過する場合の温度変化について考える。立坑は前述の条件と同様とし、水平坑道の半径は2m、岩盤の熱伝導率は2.92 kcal/m. hr. °C、地熱温度は52.6℃、坑道壁面の湿潤表面は3.2mと見積つた場合、立坑底および水平坑道出口の気流温度、水蒸気量が通気量によってどのように変化するかを計算すると、第3図および第4図のようになる。

第3図から、水平坑道を坑内気流が通過する場合には、立坑を気流が降下する場合と異なつて、通気量を増加すれば気流温度は大幅に低下することがわかる。またこの温度の低下の割合は、通気量がある量に達するまでは急激であるが、それ以上になるとだんだん緩慢となる。例えば1,000 m³/min から2,000 m³/min に通気量を増加すると気流温度は約6℃低下するが、4,000 m³/min から5,000 m³/min に通気量を増加した場合の温度低下は僅か1℃にすぎない。

通気量を増加した場合の水蒸気量は、第4図からわかるように、気流温度の低下とほぼ同様の傾向で低下する。

さらに、乾燥した水平坑道を坑内気流が通過する場合の通気量 (m³/min) は気流温度の上昇度、通気動力などを考慮すると、坑道延長(m)の0.56~0.84倍にとるのが経済的であることを述べたが²⁾、坑道壁面の一部が水で濡れている場合にもこの条件が適用できるかどうか検討してみよう。第3図および第4図を見ると通気量が3,000 m³/min 以下の時には、通気量の増加による気流温

第3図 通気量と気流温度との関係（水平坑道の場合）

第4図 通気量と水蒸気量との関係（水平坑道の場合）

度および湿度の低下が顕著であるが、通気量がそれ以上になると、通気量の増加による温度および湿度の低下は僅かであることがわかる。この例では坑道延長は4,500mであるから、3,000 m³/minの通気量は坑道延長の0.67倍に当り、この値は前述の0.56~0.84倍の範囲内にある。したがって、湿った坑道の場合でも乾燥した坑道と同じように、通気量は坑道延長の0.56~0.84倍にとるのがよいであろう。

3. 壁面の乾燥状態、岩盤の熱伝導率、坑道半径が気流温度におよぼす影響

気流が水平坑道を通過する場合には、前節で明らかにしたように、気流温度は通気量の多少によって大幅に変化するが、通気量以外に岩盤の乾燥状態、岩盤の熱伝導率、坑道半径などによつても気流温度は変化する。

例えば、坑道入口の気流温度が19.6℃、水蒸気量が、 12.8×10^{-3} kg/kg、通気量が2,000 m³/minの場合、岩盤温度を、52.6℃、熱伝導率を2.92 kcal/m. hr. °C、坑道半径を2mと見積つて、坑道壁面の乾燥状態によつて気流温度がどのように変化するかを計算すると第5図のようになる。第5図から、壁面が完全に乾燥した水平坑

第5図 坑道壁面の乾燥状態が気流温度におよぼす影響

道を気流が通過する場合の温度上昇は極めて急激であるが、壁面が多少でも水で濡れている場合には、気流温度の上昇度は緩慢となることがわかる。しかし壁面が水で濡れている場合は、気流温度は低下するが気流中の水蒸気量が増加して、単位重量の空気が有するエンタルピーは減少しないから、気流温度を低下させるために坑道壁面を水で濡らすことは得策ではない。

つぎに、これと同じ例で、坑道壁面の 25% が水で濡れている場合、岩盤の熱伝導度、坑道半径などによって気流温度がどのように変化するかを計算すると第6図および第7図のようになる。

第6図および第7図から気流温度の上昇に大きな影響をおよぼす要因は、岩盤の熱伝導度の大小で、坑道半径の大小の影響は極めて僅かであることがわかる。したがって、気流温度の低下を計るためには、熱伝導度の低い岩盤の中に通気坑道を開きすることが大切である。

4. 空気冷却設備の効果について

空気冷却器を設置して気流を冷却すると、冷却器を設置した場所では気流温度は低下するが切羽に達するまでの通気坑道では、地熱温度と気流温度との差が増加するので岩盤からの放熱量は増加し、気流温度の上昇は冷却される以前よりも迅速となり、冷却を必要とする切羽の冷却効果は減退する。したがって、空気冷却設備によって坑内を人工的に冷却する場合には、坑内の条件に応じて冷却器の設置位置および通気量を慎重に検討しなければならない。

いま、坑外からの入気が 1,120m の深さの立坑を降下して、さらに 4,500m の水平坑道を通過後、切羽のある鑿押坑道に通気される場合を考えてみよう。この場

第6図 岩盤の熱伝導度が気流温度におよぼす影響

第7図 坑道半径が気流温度におよぼす影響

合の立坑および水平坑道の条件は2節で述べた条件と同じとし、坑外には冷却能力 660,000 kcal/hr の冷却器を設置して、2,000 m³/min の入気を 15°C から 5°C まで冷却して坑内に通気するものとする。5°C まで冷却された入気が立坑および水平坑道を通過する間に、どのような温度変化をするかを計算すると第8図のようになる。

第8図から、空気冷却器の効果は冷却器からの距離が増すにしたがつて減退することがわかる。すなわち、冷却器の運転によって、冷却器の設置点では 16°C の温度低下があるが、この温度低下は立坑底では 6.6°C となり、さらに鑿押坑道入口では 3.6°C に低下する。冷却器の効果を比較するために冷却器設置点での温度低下を 1 として、通気路上の各点の温度降下を比較して設置点効率³⁾と呼ぶことにすると、設置点効率は第8図に示すように立坑底では 0.66、鑿押坑道入口では 0.36 となり、冷却器の設置点からの距離が増すにしたがつてほぼ直線的に低下する。また気流が立坑を降下する場合の方が同じ長さの水平坑道を気流が通過する場合よりも設置点効率の低下が大である。このように冷却器の設置点効率は冷却器から遠ざかるにしたがつて低下するので、空気冷却器は切羽の近くに設置する方がよい。

第9図は通気量が 2,000 m³/min の場合と 3,000 m³/min の場合の気流の温度変化を比較したものである。

第9図から、通気量が 2,000 m³/min の場合は 3,000 m³/min の場合に比較して冷却器の設置点における温度

第8図 気流の温度経過と設置点効率

低下は大きい。坑道を通過する際の温度上昇が迅速であるので、設置点から遠ざかるにしたがつて冷却効果が減退し、立坑底から1,700m以上離れると、かえって3,000 m³/minの通気量の方が冷却効果が大きくなる。このように冷却器の効果は冷却器の設置点、通気量などによつて変化するから、冷却器を設置する場合には計算式を用いて気流温度の予測を行なうことが大切である。

5. 別子鉱山における通気改善について

別子鉱山においては、以前から採鉱通風に 250HP の扇風機を設置して機械通風を行ない、坑内温度の低下を計っていたが、採鉱切羽が下部に移行するにしたがつて、地熱温度の上昇と空気の自己圧縮に基因する温度上昇のため、坑内温度は急激に上昇し、温度低下を計らなければ能率のよい採鉱は困難な状態となった。

暑い坑内を冷却する方法としては、通気量を増加する

第9図 通気量による気流の温度変化

第10図
測定結果

方法と、冷凍機などを使用して坑内を人工的に冷却する方法とが考えられるが、別子鉱山における当時の通気量は第2節において述べた経済的な通気量に達しない量であるので、まず第1に通気改善によつて通気量の増加を計ることを計画し、坑内各部の通気量、比抵抗および自然通気圧などの測定を行なつた。

第10図は風量および圧力降下の測定結果と温度の測定結果から計算した自然通気圧の値を示したものである。

ただし図中には、大立坑の風量と14番坑道面から8番坑道面までの漏風を合成して、これを大立坑の風量として表わし、また東延斜坑の風量と8番坑道面以上の漏風を合成して、これを東延斜坑の風量として表わしている。

また Q は通気量 m^3/min , ΔP は 2 点間の圧力降下 mm 水柱, NVP は自然通気圧 mm 水柱を表わしている。

第10図の測定結果から次の事項が判明した。

(1) 現在の通気系統では、排気坑道である探鉱通洞の抵抗が非常に大きくて、250HP の扇風機で発揮される通気圧の大部分はこの坑道で消費される。したがって、現状の通気系統では、扇風機の容量を大きくしても通気量の大幅な増加は不可能である。

(2) 第4通洞面以上の自然通気圧は、坑内外の温度差が比較的少ない4月でも20mm水柱と言う比較的高い値を示している。したがって、通気改善に当つては、この作用が扇風機的作用を助けるように考慮しなければならない。そこでとりあえず第11図のような通気系統に改善することとし、通気網の計算を行なつた⁷⁾。この計算結果は図中の数字のようで、通気系統の変更を行なえば坑内全般にわたつて通気量が増加することが判明した。

そこで、これを実施するために必要な諸準備を進め、昭和27年9月から通気系統の変更を実施した。

通気系統変更後の坑内各部の通気量を測定した結果は

第11図
通気改善後の
通気量の予測

第 1 表

通気系統変更後の通気量 m ³ /min				通気改善前の通気量 m ³ /min			
風 道 名		計算値	実測値	風 道 名		計算値	実測値
入気量	第4通洞	1,908	1,500	入気量	第4通洞	630	630
	探鉱通洞	530	880		第3通洞	685	210
計		2,438	2,380	計		1,325	
排気量	第3通洞	872	740	排気量	日浦通洞	180	
	東延斜坑	744	330		探鉱通洞	1,390	1,570
計		2,439	2,470	計		1,570	
下風部量	下部坑道	1,920	2,020	下風部量	下部坑道	940	
	下部漏風	1,418	1,040		下部漏風	440	
計		1,430	1,460	計			
中部風道		3,869	3,940	計			

第 2 表

	昭和 26 年				昭和 28 年			
	1月	7月	計	%	1月	7月	計	%
29℃以下	6	5	11	4.5	23	13	36	15.0
29~30℃	27	25	52	21.6	46	40	86	35.9
31~33℃	36	41	77	32.0	28	32	60	25.0
33~35℃	35	25	60	24.9	15	22	37	15.4
35℃以上	17	24	41	17.0	8	13	20	8.7
計	121	120	241	100.0	120	120	240	100.0

第1表に示す。第1表を見ると、通気網の計算結果から予測した通気量と通気系統変更後に実測した通気量との間には、余り大きな差異がないことがわかる。探鉱通洞の通気量の実測結果が計算値よりも増加しているのは、一部崩落していた坑道の取明け作業を実施したため、この坑道の比抵抗が減少したからである。このように坑内各所の通気量が増加したため、坑内温度は第2表に示すように低下した。

第2表は昭和26年と昭和28年の温度別の切羽数を比較したもので、この表から昭和26年には 31℃ 以上の温度の切羽数が全切羽数の 74% を占めていたのが、通気系統を変更した後の昭和28年には 49% に減少している。

6. 冷水による坑内冷却について⁵⁾

前節で述べたように別子鉱山の気象条件は通気改善によってかなり改善されたが、今後の採鉱の主力となる18番坑道面以下の温度はなお相当高温度であり、また、終戦後の採鉱によって全面的に採鉱することに計画変更された中部の東山地帯（大正末期以前に低品位鉱として採掘跡に充填された鉱石）も採鉱が進むにしたがつて作業環境が悪化してきた。そこでこれが解決を人工的な冷却装置を利用した気流循環方式によって計ることとし、第12図に示すような通気方式を採用した。

これは、第4通洞および探鉱通洞からの入気を東立坑（一部西斜坑）から降下させて、下部各坑道の切羽を通気した後、3号斜坑に合流させ、新立坑を経て、14番坑道風道に据付けられた600HP扇風機（現在は回転数を低下させて300HPで運転している。）を通過するような通気系統である。扇風機を通過した後の排気は、大立坑を経て、一部は東風として中部地帯の各切羽を通り、再び14番坑道に下つてもう一度扇風機を通過する。残りの部

① 扇風機 ◎ 空気冷却器 L 坑道
図中の数字は36年3月の通気量 m³/min

第12図 別子鉱山の通気系統図

分は上部立坑、日浦通洞などから坑外に排出される。なお中部地帯に循環する気流と、下部各坑道に分流する気流の温度を低下させるために、14番坑道風道および20番坑道、21番坑道、22番坑道に冷水を利用した空気冷却装置を設置した。

空気冷却装置の冷却容量および冷却コイルの仕様は第3表および第4表に示す。

空気循環方式を採用するに当つて、もつとも心配した点は空気汚染の問題である。金属鉱山では炭鉱のように爆発性のガスが湧出する恐れはないが、坑木および鉱石の酸化作用ならびに人員の呼吸による炭酸ガスの発生、酸素の欠乏などが起り、また発破のあとガスの発生がある。これらの原因による有害ガスの発生量は、従来の経験から、通気量に比べると僅かな量であることは推定されるが、空気循環方式を採用した場合、有害ガスが累積して許容量以上になるようなことがあればこの方法は採用されなくなる。しかし実施後の空気分析の結果では、炭酸ガスの含有量は 0.05% 程度で累積の傾向はなく、

第 3 表

	14L排気冷却器		20L冷却器		21L冷却器		22L冷却器	
	乾球	湿球	乾球	湿球	乾球	湿球	乾球	湿球
空気入口℃	31.5	30.0	31.0	30.5	31.0	30.5	31.0	30.5
温度出口℃	26.0	26.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
通気量 m ³ /min	4,000		500		500		750	
冷水入口℃	18.0		18.0		18.0		18.0	
温度出口℃	28.8		26.8		26.8		26.8	
冷水量 m ³ /min	2.4		0.50		0.50		0.75	
冷却全熱量 kcal/min	25,900		4,400		4,400		6,600	

第 4 表

	14L排気冷却	20L冷却器	21L冷却器	22L冷却器
フィンパイプの有効長	7'-6"	7'-6"	7'-6"	7'-0"
チューブ数	30本	20本	30本	24本
フィンのピッチ	1時に6枚	1時に8枚	1時に6枚	1時に3.5枚
列数	8列	8列	8列	12列
フィンパイプ管	アルブラック 58"×1.2mm	銅管58" 肉厚1.2mm	アルブラック 58"×1.2mm	アルブラック 58"×1.2mm
銅フィンの厚み	0.26mm	0.26mm	0.26mm	0.26mm
台数	5台	3台	2台	3台
外法寸法		長102"×高98"×幅24"	長102"×高93"×幅24"	長96"×高115"×幅25"

第 5 表

時 刻	入気側(東立坑16L見合)			排気側(3号斜坑16L見合)		
	O ₂	CO ₂	CO	O ₂	CO ₂	CO
9.00	20.4	0.02	ナ シ	20.6	0.03	ナシ
11.00	20.2	0.04	〃	20.2	0.02	〃
12.00	20.2	0.03	〃	20.2	0.03	〃
13.00	20.0	0.04	〃	20.0	0.04	〃
14.00	20.2	0.05	〃	20.4	0.05	〃
14.40				20.2	0.04	〃

第 6 表

種 別	年 別	30年	31年	32年
坑内全作業場の平均温度		32.0℃	29.7℃	28.3℃
坑内夫1工当出鉱量	t/工	1.39	1.47	1.63
1ヵ月当平均災害件数	%	100	106	117
	%	44	25	18
	%	100	57	41

第 7 表

		乾 球	湿 球
空 気 温 度	{ 入口 出口	33.0℃ 28.0℃	34.5℃ 28.0℃
風 機 風 量	{ 入口 出口	100m ³ /min	
冷 水 温 度	{ 入口 出口	18.0℃ 24.6℃	
冷 水 量		0.15m ³ /min	

一酸化炭素などの有害ガスも認められなかった。また気流中の岩粉量は空気冷却器によって約 44% 除去することができた。

空気成分は循環気流の割合が増加するにしたがつて悪くなると考えられるので、試みに第12図に示す通気系統の扇風機出口付近に設置してある入排気遮断の通気扉を開放して、循環気流量を増加して見た。この場合の入気量は、1,760 m³/min、循環気流量は 3,280 m³/min、扇風機を通過する総風量は 5,040 m³/min であった。第5表はこの場合の下部坑道の入気側と排気側の空気成分を分析した結果を示す。

第5表の分析結果から、総風量の 35% 程度の入気量を補給すれば、循環気流中に一酸化炭素は認められず、炭酸ガスの量は 0.05% 以下、酸素の含有量は 20% 以上に保たれ、労務者の保健衛生上差支えない空気成分であることがわかった。また入気側と排気側の空気成分に差異がないことから、坑内で発生する一酸化炭素や炭酸ガスなどの有害ガスの量は通気量に比べると極めて僅かな量であることが推測される。

このように気流循環方式を採用することにより、2,800 m³/min（第3通洞からの入気量を除く）の入気量で中部地帯に 2,400 m³/min、下部に 2,500 m³/min、合計 4,900 m³/min の空気量を採鉱切羽に通気することができ、採鉱切羽の温度も低下した。

第6表は別子鉱山における過去3カ年間の坑内夫1工当り出鉱量、1ヵ月当り災害件数ならびに坑内全作業場の平均温度の変化を示したものである。第6表から、坑内温度の低下にともなつて、採鉱工程は上昇し、災害件

数は減少していることがわかる。これらは坑内における種々の技術改善の結果によるものであるが、温度低下が大きな役割を演じているものと考えられる。なお気象条件の改善によって温度手当の支給額は年間 330 万円減少した。

なお、掘進切羽などの盲坑道には、クーラーと扇風機を同じ台車の上に乗せ、移動が自由にできるように設計した局部冷却器を使用している。この冷却器の仕様は第7表のようである。

7. 結 論

本論文においては、まず、気流温度に影響をおよぼす要因および冷却器を用いて坑内を人工的に冷却する場合の設置点効率について検討した。そしてその結果から次の事項を明らかにした。

(1) 従来立坑を気流が降下する場合には、空気の自己圧縮によつて 100m につき 1℃ の温度上昇があると云われていたが、これは立坑壁面で熱交換がおこらず、また水の状態変化がおこらない場合のことで、実際の坑内で見られるように立坑壁面が水で濡れている場合の温度上昇は 100m につき 0.4~0.5℃ 程度である。

(2) 気流が立坑を降下する場合には通気量を増加しても気流温度の低下は僅かであるが、水平坑道の場合には通気量を増加すると気流温度は大幅に低下する。また、通気量が一定の場合には気流温度は主として岩盤の熱伝導度、壁面の濡れの程度によつて変化し、坑道半径の大小によつては余り変化しない。

(3) 冷却器の効果は冷却器から遠ざかるにしたがつて低下するから、冷却器は切羽の近くに設置することが望ましい。管理上の要請から冷却器を坑外に設置する場合には、坑外から切羽までの距離と通気量によつて冷却効果が変化するので、冷却器の容量および通気量は気流温度の計算を行なつて決定しなければならない。

ついで、別子鉱山において実施した通気改善および冷水による坑内冷却法について論述し、これらを実施することによつて別子鉱山の気象条件は改善され、深部採鉱の解決に曙光を見出したことを述べた。

本研究に当り種々御指導を賜つた京大平松教授ならびに当社岩沢常務、戸倉別子鉱業所長、飯泉副所長に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 平松・天野・小門：坑内気流温度の実用計算，日本鉱業会誌 77巻 882号 昭和36年12月 p. 1055.
- 2) 天野：主要通気坑道を坑内気流が通過する場合の温度および湿度の変化について，水曜会誌 13巻 9号 昭和33年4月 p. 715.
- 3) Siegfried Batzel: Glückauf, Bd. 95, 1959.
- 4) 平松・岡：通気網の解法について（第2報），日本鉱業会誌 68巻 771号 昭和27年9月 p. 431.
- 5) 天野：別子鉱山における冷水による坑内冷却について，日本鉱業会誌 75巻 852号 昭和34年6月 p. 381.