

簡易型酸素プルダウン装置の試作

加 藤 弘 道^{*1}・福 地 博^{*2}

^{*1} 園芸学講座

^{*2} 農業生産学講座

(2003年10月1日受付)

緒 言

CA貯蔵庫は、農産物の鮮度を長時間保持し得る反面、イニシャルコストが高価で操作が複雑なため、貯蔵庫の所有者は現在、市町村、JA、あるいは仲買業者に限られている。個々の農家でも所有可能な小型で操作方法が簡単で、かつ低コストのガス調節装置として、窒素発生装置の開発が望まれている。窒素の製法には次のものが挙げられる²⁾。亜硝酸アンモニウム濃厚溶液および塩化アンモニウムと亜硝酸ナトリウム混合溶液を70℃に加熱する。アンモニアをニッケル粉末上において、1000℃で分解し、窒素を冷却凍結させて水素を分離する。空気を灼熱した銅の上を通じる。液体空気を分留する。空気を還元剤で処理する。LPGや天然ガスを燃焼させる。活性アルミナなどの吸着剤によって酸素を吸着させる。その他。

このうち、大気中の窒素濃度を増やして酸素濃度を下げる目的では、¹⁾、³⁾、⁴⁾が挙げられるが、¹⁾については、エカトロン方式として既に実用化されており、また、³⁾については、酸素と窒素に関して気体透過係数に差のある物質で膜を作り、これに空気を通して酸素を分離除去する交換膜方式もあるが³⁾⁵⁾、いずれもその装置はかなり大型である。また、⁴⁾についても既に実用化されているが、消耗資材を要する点に難がある。この他、⁵⁾については、空気をプロパンガスで燃焼させて酸素を二酸化炭素に交換し、冷却後ガスをスクラバ-を介して冷蔵庫内に送り込むプロパン燃焼方式としてフラッシュ式、および再循環式が、また、空気とプロパンガスの混合物を白金触媒を通過させて酸化させる酸素コンバーター方式が実用化されているが、いずれも大型になっている。

そこで、本研究では⁶⁾の銅の酸化反応を利用した簡易型酸素プルダウンシステムを開発するために、装置の試作並びにその性能試験を行った。

なお、試作・実験に終始協力された阿保宏君と高田信吾君には深く感謝します。

装置の設計・試作

1 試作機の概要

試作した酸素プルダウンシステムの概略図を第1図に示した。試作機内の空気の順路は次の通りである。貯蔵庫からファン1で吸引された空気は加温管で加熱されて接続管を通り、窒素発生管に入りさらに加熱され、銅と接触酸化して酸素が除去される。



この高温ガスを冷却銅管、冷却パイプで冷却し、ファン2で貯蔵庫内に送入する。

以上の繰り返しにより貯蔵庫内の酸素濃度を減少させ、貯蔵に最適な酸素濃度にする。

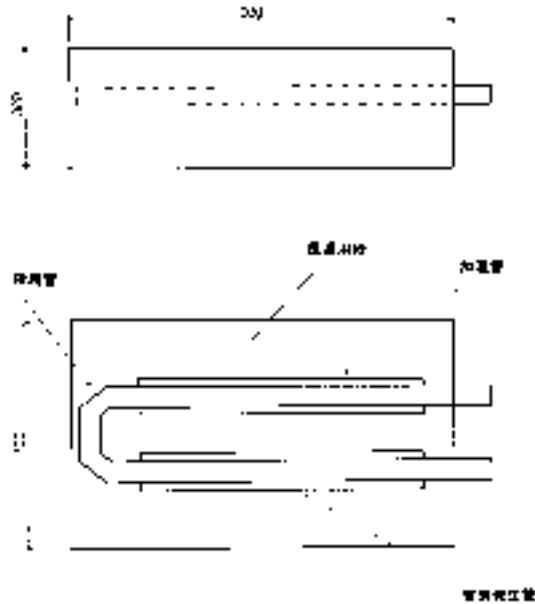
銅を空気中で300～500℃に加熱すると、酸素と化合して酸化第二銅(CuO)となる。しかし、800℃以上の高温になると、 $4\text{CuO} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + \text{O}_2$ の分解反応が起こり酸化反応にばらつきが見られるようになる¹⁾。このことを考慮して、窒素発生管内温度は 400 ± 20 ℃に保ち酸化反応を安定させるようにした。

酸化反応による酸素除去の理論値は、(1)式より、酸素1ℓ(空気量にして約5ℓ)に銅5.67gが必要ということになるが、これは銅粉としてすべて酸化した場合で、このまま試作機にあてはまるものではない。

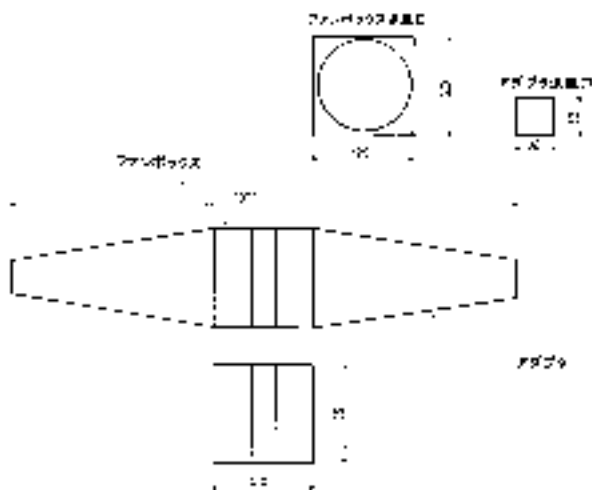
2 酸素低減装置

高温の銅に空気を通し、銅を酸化させることにより酸素を減少させ、窒素濃度の高いガスを発生させる装置は、安定した酸化反応を得るために銅の加熱には電気炉を用いた。電気炉は、電気抵抗熱を利用したもので、電気抵抗炉といい、直接式抵抗炉と間接式抵抗炉とがあるが、本研究では軽量小型で、構造が簡単な後者を採用した。試作した発生装置の概要は次の通りである。

- 1) 窒素発生管：加温管からの高温空気をさらに加熱して銅の表面を酸化させる部分で、使用温度範囲が300～500℃と比較的低いので、1000℃以下に使用されるニクロム線電気炉を試作した(第2図)。
- 2) 加温管：窒素発生管に入る前の空気に予熱を与え



第4図 酸素除去槽



第5図 送風装置

また、電圧 E [V]、時間 t [h]、電力 P [W] を用いると、 $E = IR$ より

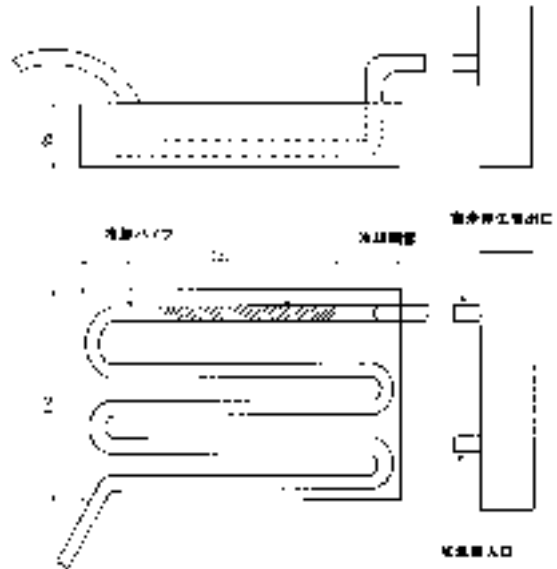
$$Q = EIt [V \cdot A \cdot h] = EIt [W \cdot h] \\ = 860 EIt [\text{cal}] \quad (4)$$

上式は直流のみに適用される。交流の場合は、 E 、 I ともに実効値をとり、 EI 間の位相角を ϕ 、力率を $\cos \phi$ とすれば、発熱量は次式で示される。

$$Q = EIt \cos \phi \quad (5)$$

酸素発生管および加温管は発熱体のみであるから純抵抗と考え、力率 $\cos \phi = 1$ とし、電流 I はクランプメータ (BT 1100 - 5, ナショナル製) で測定した。

酸素発生管の発熱量は、実測の結果、 $I = 4.57\text{A}$ 、 $t = 6\text{s}$ 、 $E = 100\text{V}$ であったので、1時間あたり、 $Q = 2742\text{J}$ または、 2358kcal となる。また、加温管の発熱量は、 $I = 4.65\text{A}$ 、 $t = 6\text{s}$ であったので、 $Q = 2790\text{J}$ 、または、 2399kcal となる。



第6図 冷却装置

4 送風装置

送風装置の概略図を第5図に示した。送風装置は、貯蔵庫の空気を酸素発生管に送り、その後冷却装置を経て再び貯蔵庫に送り返すためのものである。これは、軸流ファンを3mmの亚克力板で覆い、ファンの排気・吸気の両側に厚さ1mmの鉄板製の四角すい状のアダプタを装着したものである。

5 冷却装置

酸素低減装置より送出される空気は高温であるので、貯蔵庫に送り返す前に十分冷却する必要がある。しかし、本研究では酸素低減装置の開発に主眼を置いたので、貯蔵温度まで下げるのではなく、常温まで下げることを前提にした。冷却装置の概略を第6図に示した。試作機は水による冷却効果を利用したもので、約12lの鉄板製の容器に入れた水の中に、銅管および塩化ビニル製のパイプを設置し、水に吸熱させようとしたものである。

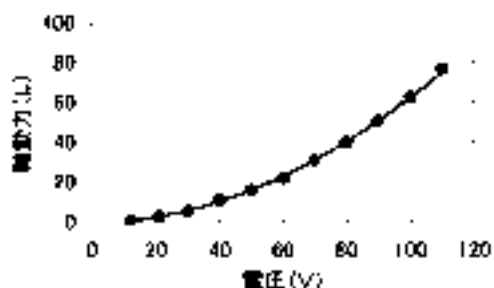
試作システムの性能試験

1 送風装置の性能試験

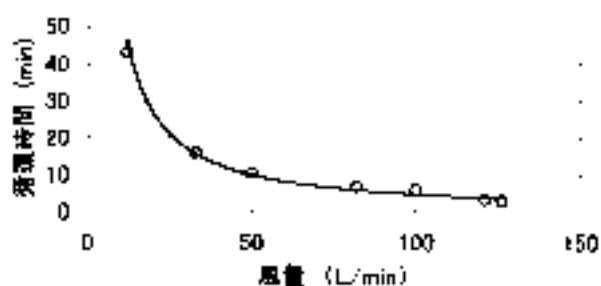
1) 試験目的および方法

本試験は、送風機の軸動力と回転速度との関係、システム内を流れる空気の損失抵抗、循環所要時間を知ることが目的とした。風速は熱線風速計 (日本科学工業製) を使用して、送風口の中心、平均温度の点 (中心から内壁までの距離を R の $0.76R$ の点)、内壁付近の3点で測定し、それらの平均風速から風量を算出した。ファンの軸回転速度はハンディデジタルタコメータ (HT 403型、小野測器製) によって測定した。

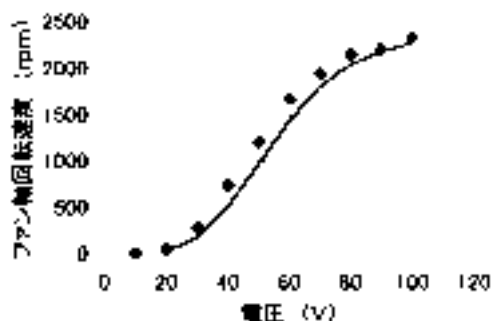
供試送風機を設置した場合、システム内の抵抗による損失がある。その損失を通常の圧力損失から求めずに、



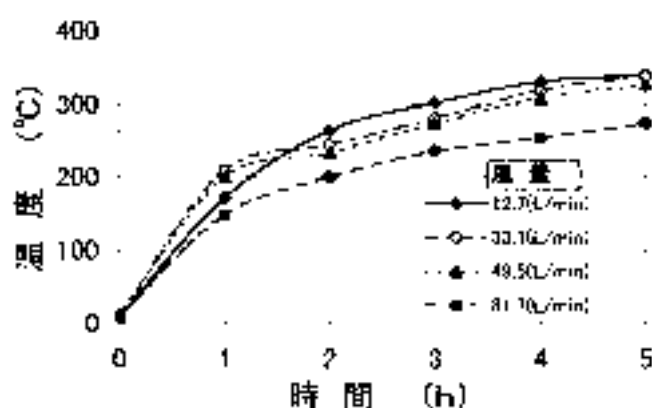
第7図 軸動力と電圧との関係



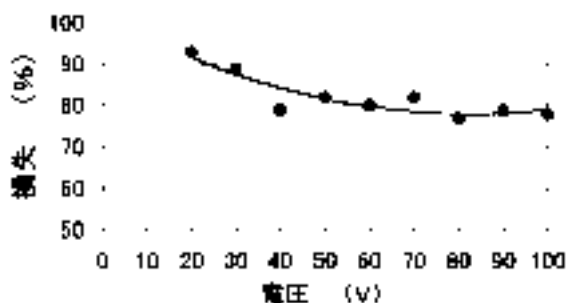
第10図 システム内循環時間と風量との関係



第8図 電圧とファン軸回転速度との関係



第11図 室素発生管の温度と時間の関係



第9図 システム内の抵抗による損失と電圧との関係

次の方法から求めた。すなわち、送風機2台のみを直列に接続運転したときの風量 Q_1 [l/min] と、第1図のように配置したときの風量 Q_2 [l/min] との関係で、次式より損失 L_v を求めた。

$$L_v = 100 (Q_1 - Q_2) / Q_1 \quad (6)$$

また、装置全体の内容積は 540 l であるが、システム内を空気が循環する時間と風量の関係を調べた。

2) 試験結果と考察

軸動力 L [W] と電圧 V [V] との関係を第7図に示した。軸動力は電圧の2乗に比例しており、次の関係式が得られた。

$$L = 6.26 \times 10^{-3} V^2 + 0.04 \quad (7)$$

ファンの所要動力は、後述の使用範囲 20 ~ 40V では、3 ~ 11W と小さいものであった。

電圧とファンの軸回転速度との関係を第8図に示した。20V 以下の低電圧ではファンは回転せず、30 ~ 70V では風量は 10 ~ 100 l/min、ファン回転速度は 300 ~ 2000rpm と急増した。また、80 ~ 100V ではファンの軸回転速度はあまり変化せず、風量の増加も緩慢

であったことより、このファンの限界はファン軸回転速度 2200rpm、風量 125 l/min、軸動力 50W、電圧 90V 付近と思われる。

システム内の抵抗による風量損失と送風機の電圧との関係を第9図に示した。損失は、ファンの始動時の 20 ~ 30V では非常に大きく 90 % 以上で、風量が安定する 40 ~ 100V では 80 % 付近の一定値を示している。すなわち、無負荷のときを 100 % とすると、供試装置内の風量はわずか 20 % に過ぎない。これは、冷却パイプが長さ 3 m に渡って蛇行していることによるものと思われる。

空気が装置内を循環する時間と風量との関係を第10図に示した。所要時間 t [min] は、風量 Q [l/min] の増加に反比例して減少しており、その関係式は次の通りであった。

$$t = 5 \times 10^{-2} Q^{-1} \quad (8)$$

2 酸素低減装置の温度に及ぼす風量の影響

1) 試験目的および方法

室素発生管と加温管の温度は、送入される空気の流量により変化する。本試験では、風量と室素発生管の温度との関係を求め、銅の酸化反応に適した温度 (300 ~ 500) を維持するために必要な風量を求めることを目的とした。

試験方法は、ファンに与える電圧を変化させ、そのときの室素発生管の温度を、出口から管内に向かう 3 cm の位置において表面温度計 (横河 YEW 2677) で計測したも

第1表 装置内各部の温度

	外気温	窒素発生管出口	冷却銅管直後	冷却パイプ出口
温度(℃)	15.1	340	84.3	20.4

のである。

2) 試験結果と考察

窒素発生管の温度と時間との関係を第11図に示した。窒素発生管の温度は、電源を入れてから4時間後には、81.7 l/min (60V時)を除いて、300℃以上に達した。しかし、340℃付近でピークに達し、それ以上の温度には上昇しない。

供試した窒素発生管に必要な温度域は300～500℃であるから、60Vより1レンジ下の50V時(49.5 l/min)以下の風量を用いることとし、また、2V時の風量2 l/minでは、システム内の空気循環に多大な時間を要したので、1レンジ上の30V時の風量12.7 l/minを用いることにした。このように、窒素発生管に送ることのできる風量は、12.7～49.5 l/minが妥当と考えられるが、その値をいくらにするかは、後述の銅の酸化反応時間とシステム内循環時間より検討することにした。

供試した窒素発生管は、本来1000℃までの電気炉であるが、送風のため熱を奪われ、管出口の温度は340℃程度であった。そこで、送風空気によって奪われる熱量を試算してみる。窒素発生管内部温度 t_1 をその出口温度より多少高いものと考え400℃とし、送風しない場合の内部温度 t_2 を1000℃とすれば、奪われた熱量 Q は、次式⁴⁾より

$$Q = G \int_{t_1}^{t_2} C dt = GC_m(t_2 - t_1) \quad (9)$$

送風量が33.1 l/minのとき(40V時)では、6918 cal/minとなる。

3 冷却装置の性能試験

1) 試験目的および方法

試験の目的は、窒素発生管から排出された高温空気が、試作した冷却装置でどの程度冷却されるかを知ることとした。

試験方法は、窒素発生管から排出される空気の温度を表面温度計で、また、冷却銅管直後および冷却パイプ直後の温度をC/C熱電対で測定した。冷却銅管および冷却パイプの放熱量は(9)式で算出される³⁾。ただし、(9)式で、 Q :放熱量(kcal)、 C :比熱(kcal/kg℃)、 t_1 :初期温度(℃)、 t_2 :冷却後の温度(℃)、 C_m :温度 t_2 時と t_1 時との平均比熱(kcal/kg℃)とする。

2) 試験結果と考察

温度の測定結果を第1表に、試算した放熱量を第2表に示した。冷却銅管および冷却パイプからなる簡単な装置ではあるが、窒素発生装置から排出された高温(340℃)の空気をほぼ常温(20℃)まで冷却することができ、

第2表 冷却銅管および冷却パイプの放熱量

	冷却銅管	冷却パイプ	合計
放熱量(kJ)	11.34	2.75	14.05

十分な冷却効果を得た。

冷却銅管に比べ冷却パイプの放熱量は少なく、実用化の折には冷却銅管を長くしたほうが冷却効果が上がり、冷却装置を小型化できるように思われる。

4 試作システムの性能および効率

1) 試験の目的と方法

試験の目的は、試作した装置全体の性能および効率を求めようとするものである。

試作したシステムは、加熱した窒素発生管内に種々の表面積の銅板を入れ、その酸化により空気中の酸素を除去するもので、銅板には、管内への出し入れが便利のように直径1.2mm、長さ45～50cmの針金を取り付けた。

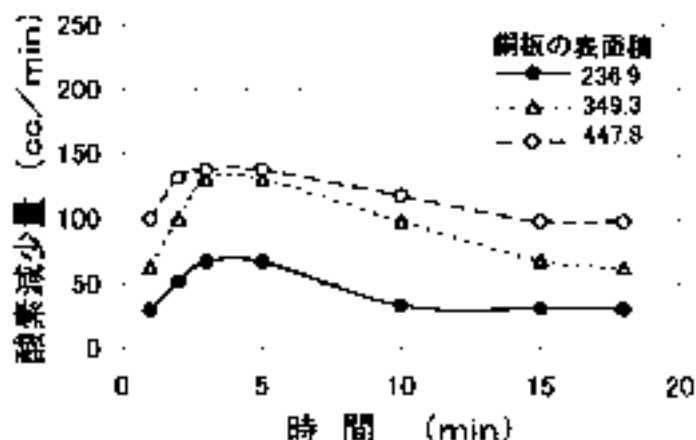
酸素濃度は、北川式酸素測定器(OM 413)を使用し、銅板を窒素発生管に挿入してから15分間、冷却装置出口での濃度を測定した。これは銅の酸化反応の進行状況を把握するために行ったものである。

一方、貯蔵庫内の酸素濃度を攪拌用のファンで均一にしておき、システム内の空気が全て循環する16分後に(ファン電圧40V、風量33.1 l/minとした場合)貯蔵庫内の酸素濃度を測定し、システム内の酸素除去量を算出した。

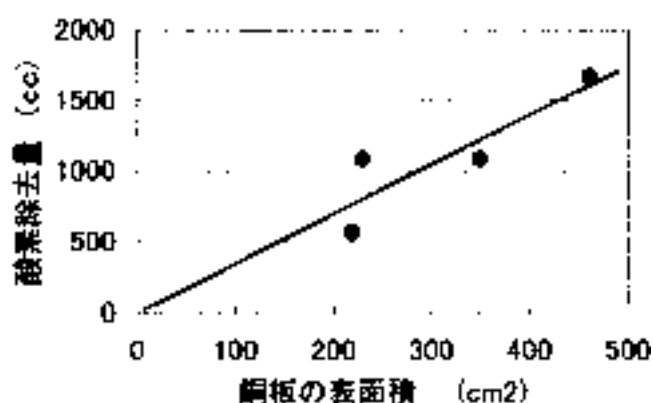
2) 試験結果と考察

銅板の酸化反応時間と酸素減少量との関係を第12図に示した。ここで、酸素減少量とは、冷却装置出口で測定した酸素濃度と風量より算出した1分間当りの酸素除去量のことである。酸素減少量は、銅板を窒素発生管に挿入した直後より急激に上昇し、3～4分後にピークに達した。その後は徐々に反応は鈍くなり、12～13分後には酸化反応を終了した。また、酸化反応は銅の表面積の大小に関わらず10～15分で一定の値を示した。これは、供試銅板の酸化反応が表面のみで行われたことによるものと思われる。したがって、酸素減少量が一定になる時期は酸化反応が終わる時期であり、また、システム内を空気が1循環してくる時期でもあると考えられる。以上より、ファンの風量は、15～16分でシステム全体を循環できる容量で、かつ、窒素発生管出口の空気温度が300℃を超えることができるものが適当と考えられ、第10図、第11図より、40Vのときの風量33.1 l/minをこのシステムの最適風量とした。

酸素除去量と銅板の表面積との関係を第13図に示し



第12図 銅板の酸化反応時間と酸素の減少量(風量33.1L/min時)



第13図 銅板表面積と酸素除去量

た。両者の関係はほぼ正比例の関係にあり，その実験式は次の通りである。

$$Z = 3.22A + 62.6 \quad (10)$$

ただし， Z ：酸素除去量〔ml〕， A ：銅板の表面積〔cm²〕

この式から，酸素1l(空気容量にすると約5l)を除去するのに，約300cm²の表面積を持った銅板が必要となる。

結 論

試作した窒素発生管および加温管は，ニクロム線電気炉を応用したもので，その発熱量は窒素発生管393kcal/h，加温管375kcal/hであり，また，温度は340℃まで上昇した。しかし，予熱時間に長時間を要し，また，多量の銅板を挿入したときには温度が300℃以下となり，酸化反応が緩慢になる恐れがある。この解消には炭化ケイ素(SiC)電気炉を用いることが考えられる。

送風装置に使用した軸流ファンの性能の限界は，ファン軸回転数2200rpm，風量125l/min，軸動力50W，電圧90V付近であった。送風装置の内部抵抗が大きく，風量に80～90%の損失を生じた。このように，内部抵抗の大きい場合は軸流ファンの代わりにシロッコファンを用

いたほうが良いように思われる。

冷却装置については，冷却銅管および冷却パイプの表面より，空中あるいは水中に放熱することにより，高温空気を冷却する簡易な方法を採用したが，この方法で，空気を約340℃から20℃の常温まで冷却することができ，十分な効果が得られた。

酸素低減装置については，銅板面積 A 〔cm²〕と酸素除去量 Z 〔ml〕との関係式は，

$$Z = 3.22A + 62.6$$

で与えられ，5lの空気から1lの酸素を除去するには約300cm²の表面積の銅板が必要という結果を得た。この結果は実用上，大きな表面積の銅板を必要とし，効率の悪いものである。その原因は銅の酸化が表面のみで行われ，内部まで浸透していないことによるものと思われる。よって，銅粉を使用することにより表面積を著しく増加させて効率を上げることが考えられるが，そのハンドリングは難しい。

ところで，現在実用化されているガスバーナを用いた簡易なCAガス発生装置の酸素プルダウン能力には，ガス濃度の微調整において限界がある。そこで二次的な酸素除去装置として本試作機を用いると，銅板の使用量も少なく，また，簡単な操作で低酸素濃度のCA条件を作り出すことができよう。

送風装置と酸素除去装置の見直しと、青果物を貯蔵庫内に入庫したときの性能試験、および直接燃焼方式を併用した場合の性能試験などが今後の課題となろう。

摘 要

小型で構造および操作が簡単で、かつ低コストの酸素低減装置の開発を目的として、銅の酸化反応を利用した簡易型酸素プルダウンシステムの試作並びに性能試験を行った。その結果は、次の通りである。

- 1) 試作機は、送風装置、酸素低減装置(窒素発生管、加温管、接続管よりなる)、冷却装置より構成される。
- 2) 窒素発生管および加温管は、ニクロム線電気炉を応用したもので、温度は銅の酸化反応に必要な 340℃ 付近まで上昇したが、所定の温度に達するまでに長時間を要した。
- 3) 送風装置の所要動力は、3 ~ 11W と小さいものであったが、内部抵抗による風量の損失は 80 ~ 90 % と

大きかった。

- 4) 冷却装置は、約 340℃ の高温空気を 20℃ の常温まで容易に冷却することができた。
- 5) 試作機の酸素除去能力 $Z [m^3]$ は、銅板面積を $A [cm^2]$ とすれば、 $Z = 3.22A + 62.6$ であった。
- 6) 以上の結果より、供試機は単独で用いるより、直接燃焼方式による CA ガス発生装置の補助的な酸素低減装置としての使用に適するものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 赤堀四郎, 木村健二郎: 化学実験辞典, 講談社, 33 頁, 1973
- 2) 化学大辞典編集委員会: 化学大辞典, 共立出版, 890 ~ 892 頁, 1970
- 3) 工藤亜義: CA 貯蔵, 農文協編: 果樹園芸大百科 18 - 果樹共通技術, 農山漁村文化協会, 535 ~ 542 頁, 2000
- 4) 大賀恵二・斎藤 武: 工業熱力学通論, 日刊工業新聞社, 9 ~ 10 頁, 1975
- 5) 山下律也他: 新版農産機械学, 文永堂, 173 ~ 177 頁, 2000

Trial Manufacture of Simple Handling System for Oxygen Pull down

Hiromichi KATO^{*1} and Hiroshi FUKUCHI^{*2}

^{*1} Laboratory of Horticultural Science

^{*2} Laboratory of Agricultural Production

SUMMARY

For the purpose of development small, simple on structure and handling, and low cost oxygen pull down system, we made a test model and experimented its performance test.

The test model consists of blowing system, oxygen pull down system and cooling system. And oxygen pull down system is composed of nitrogen generation equipment, heating element, and junction pipe.

The nitrogen generation equipment and heating element were put nichrome wire electric furnace to practical use, temperature had risen above 340℃ or more. But it took a long time to reach the appointed temperature.

The power required was little (from 3W to 10W), but loss of quantity of airflow was serious.

The cooling system was able to cool the air from about 340℃ to 20℃.

A capacity to remove oxygen $Z [m^3]$ of the test model is described next equation, when the surface area is $A [cm^2]$

$$Z = 3.22A + 62.6$$

For the result mentioned above, the test model will be more suitable to secondary system of CA gas generator by combustion of air than using individual.