PNC TN8470 97-003

混合酸化物燃料ペレット製造工程の電気炉設備における火災爆発に対する安全性評価

１９９７年11月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については，下記にお問い合わせ下さい。
〒319－11　茨城県那珂郡東海村大字村松４－３３
動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所　技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to:Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

PNC TN8470 97-003
１９９７年11月

混合酸化物燃料ペレット製造工程の電気炉設備における火災爆発に対する安全性評価

青木　義一*　　久芳　明慈*

要　　旨

混合酸化物燃料ペレット製造工程において，火災・爆発が最も心配される工程は電気炉で焼結・焙焼還元を行う工程である。この理由は，ペレット等の処理に火災・爆発の可能性を有する水素ガスを焼結ガス（あるいは還元ガス）として用いていることによる。

水素を含む焼結ガスの安全性については，施設の使用許可申請時点で既に検討されているが，本報では，最新の研究結果等の知見も取り入れ，その安全性を再検討し，電気炉及び電気炉を設置するグローブボックス等における水素濃度等の管理値の設定根拠を明確にした。なお、火災・爆発防止に対する安全を確保するために必要な水素濃度等の測定項目以外に、電気炉部材、ペレットの保護のため、自主的に露点等を測定する場合の管理値の根拠も併せて検討した。

また，電気炉からグローブボックス内に排気される焼結ガスの挙動をシミュレーションにより明らかにし，電気炉設備を設計・製作する際，火災・爆発防止の観点で考慮すべき事項を明確とした。

なお、本報の第２章は、製造課 FBR グループ及び ART グループの各第３班の班員教育用資料を改編したものである。

＊　プルトニウム燃料工場 製造加工部 製造課

目　　次

第１章　目的と概要
1.1　目　的 …… 1
1.2　焼結ガスの爆発に対する安全性についての要約 …… 1
1.3　電気炉設備における水素濃度，酸素濃度管理値の設定根拠の総括 …… 2
1.4　グローブボックス内に放出された焼結ガスの挙動の要約 …… 6

第２章　焼結ガスの爆発に対する安全性評価と電気炉設備における水素，酸素濃度等の管理値の根拠
2.1　目　的 …… 8
2.2　水素の爆発の特徴 …… 8
2.3　水素－窒素混合ガス及び水素－Ar 混合ガスの爆発に対する安全性 … 10
2.4　電気炉の運転における爆発の可能性評価と酸素濃度管理の考え方 …… 18
2.5　露点の管理について …… 21
2.6　実際の電気炉運転等への検討結果の反映 …… 24
2.7　電気炉爆発時のグローブボックス負圧に及ぼす影響について …… 26

第３章　炉から水平方向に放出される排ガスによるグローブボックス内の水素濃度に関する考察　～ベントから水平方向に放出されるガスの広がりに関する考察～
3.1　目　的 …… 27
3.2　水素ガスの安全性 …… 27
3.3　放出ガス濃度計算モデル …… 28
3.4　ガス拡散のシミュレーション条件 …… 32
3.5　ガス拡散のシミュレーション結果 …… 35
3.6　ガス拡散のシミュレーション結果の考察 …… 37
3.7　ま　と　め …… 38

[参　考　文　献] …… 55

第１章　目的と概要

1.1　目　的

混合酸化物燃料ペレット製造工程において，火災・爆発が最も心配される工程は電気炉で焼結・焙焼還元を行う工程である。この理由は，処理に火災・爆発の可能性を有する水素ガスを焼結ガス（あるいは還元ガス）として用いていることによる。

水素を含む焼結ガスの安全性については，施設の使用許可申請時点で既に検討されているが，本報では，最新の研究結果等の知見も取り入れ，その安全性を再検討し，電気炉及び電気炉を設置するグローブボックス等における水素濃度等の管理値の設定根拠を明確にした。（第２章）

また，電気炉からグローブボックス内に放出される排気焼結ガスの挙動をシミュレーションにより明らかにし，電気炉設備を設計・製作する際，火災・爆発防止の観点で考慮すべき事項を明確にした。（第３章）

なお，第２章は教育資料の内容に一部加筆したものである。

1.2　焼結ガスの爆発に対する安全性についての要約

第２章に詳細に記述している焼結ガスの爆発に対する安全性についての検討結果のポイントを以下に列記する。

(1)　水素－窒素混合ガスが常温において空気と混合した場合，水素濃度 6.1%以上かつ，酸素濃度 5.0%以上にならないと爆発の可能性は生じない。

このため，第二開発室で使用している 5%水素－窒素混合ガスは，常温で空気と混合しても，いかなる場合も爆発の可能性は生じない。

ただし，水素濃度が 8%以上となる場合は爆発の可能性が生じてくる。

(2)　水素－Ar 混合ガスが常温において空気と混合した場合，水素濃度 3.8%以上かつ，酸素濃度 3.4%以上にならないと爆発の可能性は生じない。

このため，第三開発室で使用している 5%水素－Ar 混合ガスは，常温で空気と混合した場合，爆発の可能性を持つため，爆発防止のための措置が必要である。

(3)　水素は 600℃以上の温度では自己発火するため，爆発は起こさない。爆発を考慮する温度領域は 600℃以下の温度領域である。

(4) 電気炉が 600℃以下の加熱状態にある場合，混合ガスの爆発下限水素濃度，酸素濃度は常温時の 2／3 程度の濃度まで低下すると推定される。したがって，加熱下においては，常温より爆発の可能性は拡大する。

(5) 5%水素－窒素混合ガスは加熱状態にある電気炉で使用しても，現実には爆発の可能性はほとんどない。

(6) キルン等の水平炉の場合は，垂直炉に比べると爆発に対する安全性は 1.6 倍（爆発下限水素濃度，酸素濃度に対して）ほど大きい。

(7) 水素濃度が 10%以下の場合は，爆発が起きた時の圧力上昇は 1.5 気圧程度にしかならない。

このため，電気炉は安全を見て 2.5 気圧程度の耐圧強度を有していれば十分である。

1.3 電気炉設備における水素濃度，酸素濃度管理値の設定根拠の総括

第２章での検討結果から設定した電気炉の水素濃度管理値等の設定根拠の総括を以下に記す。

なお、使用変更許可申請書等において管理が規定されている項目の区分は、表 1-1 のとおりである。表 1-1 の◎、○を付けた項目は火災・爆発防止の観点から測定（測定精度の管理含む。）が規定されているものである。従って、これらの項目については特にその管理値の設定根拠を明確にしておく必要がある。その他の項目については、安全の観点ではなく、炉部材・ペレットの保護を主眼に置いたものであるため、使用変更許可申請書等に規定はない。このため、以下に述べるこれらの項目の管理値の設定根拠は自主的に管理を行う場合の目安値であり、必ずしも全て測定管理する必要はないものである。また、他の方法で管理できる場合は、管理方法を変更しても差し支えない。

表 1-1　使用変更許可申請書等において管理が規定されている項目

項　　目	第２開発室	第３開発室
供給ガス水素濃度		◎
ｸﾞﾛｰﾌﾞﾎﾞｯｸｽ内水素濃度		◎
出口ガス酸素濃度		◎*
供給ガス酸素濃度		
出口ガス露点		
工程室内水素濃度	○	○

◎：使用変更許可申請書に規定あり

○：平成９年５月の理事による安全点検で提起

＊　運転中常時監視ではなく、炉内ガス置換後、昇温開始前に混合ガス中の酸素濃度を確認することのみが規定されている。

(1)　プルトニウム燃料第三開発室の電気炉の管理

①　供給ガス水素濃度　ノミナル 4.7%　上限 5.2%でユーティリテイ側で調整

電気炉設備入口で、

連続焼結炉　　6%（警報レベル）7%（炉停止レベル）

バッチ式焼結炉　6%（炉停止レベル）

常温において Ar－水素－空気 3 元系の爆発下限水素濃度は 3.8%，爆発下限酸素濃度は 3.4%であるため，5%水素－Ar 混合ガスは空気と混合した場合，爆発の可能性のある領域が存在する。管理値は爆発の可能性をできる限り低減するために設定。

②　グローブボックス内水素濃度

1%（警報レベル），3%（炉停止レベル）

グローブボックス内における爆発防止の観点から設定した値。上記の Ar－水素－空気 3 元系の常温における爆発下限水素濃度 3.8%を基に安全側に設定して 3%を炉停止レベルとした。警報レベルはその 1／3 の 1%とした。通常は 0.1～0.2%である。

③ 出口ガス酸素濃度 （600℃以下の温度領域で監視）

連続焼結炉 7000ppm（炉停止レベル）

バッチ式焼結炉 1000ppm（警報レベル）、3000ppm（炉停止レベル）

ペレット及び焼結皿，リフレクター，ヒーターの酸化からの保護を目的に設定。600℃以下では 4000～5000ppm が酸化の上限。これを安全側に設定した。連続焼結炉は 600℃以下の状態は立ち上げ及び降温時のみが相当。連続焼結炉は炉材にレンガを使用しており，昇温中に吸着した空気が放出されるため，7000ppm に設定している。なお，連続焼結炉は立ち上げ時は，窒素を流し，ペレットは装荷していない。焙焼還元炉及び予備焼結炉では供給ガス酸素濃度のみの管理で可。

④ 供給ガス酸素濃度

連続焼結炉 1000ppm（炉停止レベル）

バッチ式焼結炉及び焙焼還元炉 500ppm（警報レベル）

1000ppm（炉停止レベル）

ペレット及び焼結皿，リフレクター，ヒーターの酸化からの保護及び供給配管への空気のリークを検知することを目的に設定。出口ガス酸素濃度，露点をできる限り低く管理するため出口ガス酸素濃度の 1／2～1／3 の値に設定。なお増加分は炉体のリーク分及びペレットからの発生分である。なお，焙焼還元炉では炉部材の酸化等の考慮は不要。

⑤ 出口ガス露点（600℃以上の領域では酸素濃度に代って監視）

連続焼結炉 －10℃

バッチ式焼結炉 －10℃

600℃以上の温度におけるペレット及び焼結皿，リフレクター，ヒーターの酸化からの保護及び供給配管への空気のリークを検知することを目的に設定。600℃以上では炉にリークした空気中の酸素は水素と反応して水となるので露点によりリークを検知する。－10℃は過去のトラブルで酸化が確認された露点が 0℃付近であったことから安全側に設定した値である。焙焼還元炉では規定しない。

⑥ 工程室内水素濃度

1000ppm（警報レベル），4000ppm（炉停止レベル）

工程室内において電気炉設備までのガス供給配管からのリークを検知するために設定した値。常温における爆発下限水素濃度 3.8%の約 1／10 である 4000ppm を炉停止の管理基準とした。さらにその 1／4 の 1000ppm を警報レベルとした。

なお，爆発のみの観点で管理するなら爆発下限水素濃度より若干低めの 2～3%程度で管理していれば十分である。

しかし，工程室内容積は炉容積よりはるかに大きく，換気も行われているため，室内の水素濃度が 2～3%に到達することは，配管が完全に破断しても想定できない。（仕上(1)室の水素濃度計はフルスケールが 2000ppm であるため，2000ppm を炉停止レベルとしている。）

(2) プルトニウム燃料第二開発室の電気炉の管理

① 供給ガス水素濃度　ノミナル 4.7%　上限 5.2%でユーティリテイ側で調整
焼結炉，予備焼結炉，焙焼還元炉入口で 6%（炉停止レベル）

常温において窒素－水素－空気 3 元系の爆発下限水素濃度は 6.1%，爆発下限酸素濃度は 5.0%であるため，5%水素－窒素混合ガスは空気と混合した場合，常温においては，いかなる場合も爆発を起こす可能性はない。ただし，ユーティリティ側で混合割合を誤り，8.0%以上の水素濃度の混合ガスが供給された場合には爆発の可能性を生じる。

この管理値は爆発の可能性をできる限り低減するため8%をより安全側に6%で管理するために設定した。

② グローブボックス内水素濃度
2%（警報レベル），5%（停止レベル）

グローブボックス内における爆発防止の観点から設定した値。上記の窒素－水素－空気 3 元系の常温における爆発下限水素濃度 6.1%を基に安全側に設定して5%を炉停止レベルとした。警報レベルはその 1／3 程度の 2%とした。通常は 0.1～0.2%である。

③ 出口ガス酸素濃度（降温時 600℃以下の温度領域及び空焼き時の昇降温時 600℃以下の温度領域で監視）
焼結炉　1000ppm（警報レベル），3000ppm（炉停止レベル）

ペレット及び焼結皿，リフレクター，ヒーターの酸化からの保護を目的に設定。600℃以下では 4000～5000ppm が酸化の上限。これを安全側に設定した。

なお，ペレット装荷時の昇温中はペレットから還元に伴う水分，ガス等が放出されるため，一般的に高めの値となる。昇温時の設定値は別途，実績を見て設定する。予備焼結炉及び焙焼還元炉では規定しない。

④ 供給ガス酸素濃度

焼結炉，予備焼結炉，焙焼還元炉とも

500ppm（警報レベル），1000ppm（炉停止レベル）

ペレット及び焼結皿，リフレクター，ヒーターの酸化からの保護及び供給配管への空気のリークを検知することを目的に設定。

⑤ 出口ガス露点（ペレット装荷時における600℃以上の領域及び空焼き時の昇降温時600℃以上の領域で酸素濃度に代って炉内への空気の漏洩を監視）

ペレット装荷状態の昇温時の監視は1000℃以上の領域

焼結炉　－10℃

600℃以上の温度におけるペレット及び焼結皿，リフレクター，ヒーターの酸化からの保護及び供給配管への空気のリークを検知することを目的に設定。600℃以上では炉にリークした空気中の酸素は水素と反応して水となるので露点によりリークを検知する。－10℃は過去のトラブルで酸化が確認された露点が0℃付近であったことから安全側に設定した値である。

なお，ペレット装荷した状態で焼結炉を昇温している時はペレットの還元により大量の水分が発生し，露点は－10℃よりも高い値となる。高い状態は1000℃付近まで続くため，ペレット装荷状態の昇温時は1000℃以上の領域に適用する。

⑥ 工程室内水素濃度

1500ppm（警報レベル），6000ppm（炉停止レベル）

工程室内において電気炉設備までのガス供給配管からのリークを検知するために設定。常温における爆発下限水素濃度6.1%の約1／10である6000ppmを炉停止の管理基準とした。また，さらにその1／4の1500ppmを警報レベルとした。

なお，5%水素－窒素混合ガスは常温においては，水素濃度が8%を越えない限り，いかなる場合も爆発の可能性はない。

1.4 グローブボックス内に放出された焼結ガスの挙動の要約

グローブボックス内に焼結ガスが放出されると，水素濃度や混合ガスの種類によってはグローブボックス内の空気と混合して爆発組成となる部分が放出口付近に存在する。この部分は焼結ガスがグローブボックス内に拡散することにより消失するが，爆発組成となる領域に着火源となるものが存在すると爆発が起きることが考えられる。

第3章においては，第三開発室 FBR ラインの連続焼結炉を計算モデルとして水素濃度の異なる水素－Ar 混合ガスを各種口径，本数の放出口からグローブボックス内に放出した場合の水素濃度分布を求めた。爆発組成範囲は水素濃度 4%となる長さで評価した。この値は水素－Ar－空気　3元系における爆発下限水素濃度3.8%を目安としたものである。評価に当たっては窒素－水素混合ガス及び CO_2 ガスを使用した場合も参考として計算している。

なお，本評価はグローブボックス内に放出された焼結ガスは 60℃のまま拡散するという条件としていることと，グローブボックス内の空気は全く流動していないとして計算しているため，実際の 4%水素濃度長さは遥かに短い。

主な知見を以下に示す。

(1) 第三開発室 FBR ラインの連続焼結炉で 4.7%水素－Ar 混合ガスを規定流量（9.7N m^3／hr）流した場合，4%水素濃度長さは約 25 cm程度である。

(2) 同様に 8%水素－Ar 混合ガスを規定流量（9.7N m^3／hr）流した場合，4%水素濃度長さは約 43 cm程度となる。

(3) 太い口径の放出管から放出するより，細い口径の放出管から放出させた場合の方が，ガス流速が大きくなることにより拡散しやすくなり，4%水素濃度長さは短くなる。(1)の場合，放出管口径を 1／2 にすると 4%水素濃度長さは 2／3 の 17 cm程度になる。

(4) 4.7%水素－Ar 混合ガスの代わりに 4.7%水素－窒素混合ガスを規定流量（9.7N m^3／hr）流した場合，4%水素濃度長さは約 29 cm程度と多少長くなる。これは窒素と Ar の比重差によるものである。

なお，水素－窒素混合ガスの場合は 6%水素濃度長さで爆発範囲を評価するが，8%以上の水素濃度にならないと 6%水素濃度長さは存在しない。

水素－Ar 混合ガスを用いる電気炉設備を設計・製作する際は，排ガスのグローブボックス内放出部における 4%水素濃度長さを見積もり，その組成範囲には着火源となる電気部品等は設置してはならない。この範囲を短くする方法としてはできるだけ細い口径の排気管を複数設置することが望ましい。なお，第三開発室 FBR ラインの連続焼結炉等の電気炉のグローブボックス内への焼結ガス放出口付近の 4%水素濃度長さ領域には電気部品等は全く設置されていない。

第2章　焼結ガスの爆発に対する安全性評価と電気炉設備における水素，酸素濃度等の管理値の根拠

2.1　目　的

ペレット製造設備において最も爆発が心配される設備は，予備焼結炉，焼結炉及び焙焼還元炉等の電気炉設備である。

これらの設備が心配の対象となる理由は，焼結ガスにArや窒素で希釈しているとはいえ爆発性のガスである水素を使用していることによる。このため，焼結炉等の電気炉設備では爆発防止等の観点から表2-1のような管理値を設けて運転を行っている。

表2-1　電気炉設備の水素，酸素濃度等の管理値（第3開発室設備）

	供　給 水素濃度	ｸﾞﾛｰﾌﾞﾎﾞｯｸｽ内 水素濃度	供給ガス 酸素濃度	出口ガス 酸素濃度	出口ガス 露　点
連続 焼結炉	6%(警報) 7%(運転停止)	1%(警　報) 3%(運転停止)	1000ppm (運転停止)	7000ppm (運転停止)	-10℃ (運転停止)
バッチ式 焼結炉	6%(運転停止)	1%(警　報) 3%(運転停止)	500ppm(警　報) 1000ppm(運転停止)	1000ppm(警　報) 3000ppm(運転停止)	-10℃ (運転停止)

本章では，焼結ガスの爆発に対する安全性を評価し，電気炉設備における水素，酸素濃度等の管理値の根拠を明らかにし，さらに電気炉の設計上及び運転上にそれらをどの様に反映しているか整理した。

2.2　水素の爆発の特徴

水素は酸素と混合して点火すると爆発を起こし非常に大きなエネルギーを発生させる。しかし，水素自体は爆発せず，必ず適量の酸素等の酸化剤と均一に混合した場合のみに爆発が起きる。さらに爆発が起こる水素の濃度と酸素（空気）の濃度は，火炎の伝播形態により差がある。表2-2に空気と水素が混合した気体の爆発限界（爆発を起こす水素濃度の範囲）を示す[1]。

水素ガスを用いる場合の安全評価は，表2-2の中で最も厳しい値である火炎上方伝播の場合の4.0～75.0%水素で行っている。Pu工場のように，水素をArや窒素で希釈して用いている場合は，上限濃度側を考慮する必要はなく，下限濃度側の4.0%で爆発の評価を行う。

なお，表 2-2 の中で火炎の上方伝播と下方伝播での水素下限濃度には 4～5%もの差があるが上方伝播の方が低くなるのは，爆発によりガスが膨張し，そのガスが軽いために素早く上方に移動（対流）し，火炎の伝播方向とも一致するためである。

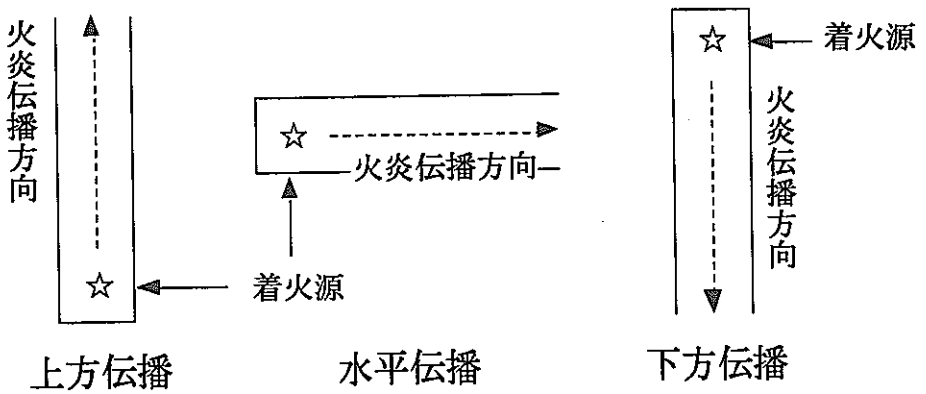
なお，水素濃度が 10%以下の場合の爆発は特異な性質があり，この場合は全ての水素が燃焼する訳でなく，爆発後の雰囲気中にかなりの水素が残留する。この特徴は水素のみに見られ，他の爆発性ガスでは全く見られない。水素濃度 4～8%程度の領域の爆発圧力は極めて低く，せいぜい 2 気圧程度の圧力にしかならない。[5)]

この領域の爆発に対してより激しい爆発を「爆ごう（デトネーション）」と呼び，区別している。爆ごうの場合は，火炎伝播速度が音速を超えるため，衝撃波を伴い，激しいエネルギーが拡散する。アスファルト固化施設の爆発は，爆ごうの範疇に入るものと推定されており，破損したシャッター，窓ガラス等は爆ごうに伴う衝撃波によるものである。水素濃度が 5%程度の焼結ガスでは，万が一爆発が起きても決してあのような状況になることはあり得ない。水素爆発の場合，水素濃度が 16%以上にならないと爆ごうは起きない。

したがって，水素濃度が 5%程度と薄い焼結ガスを使用する電気炉は耐圧強度として，安全側に 2.5 気圧程度が担保されれば，万が一の爆発に対しても安全である。

表 2-2　空気中における水素の爆発限界（常温，常圧）

管　形　状	火炎伝播形態	爆発水素濃度範囲(%)
密閉管	上　方	4.15～75.0
	水　平	6.50～？
	下　方	8.80～74.5
開放管	上　方	4.00～75.0
	水　平	6.20～71.4
	下　方	8.90～71.2



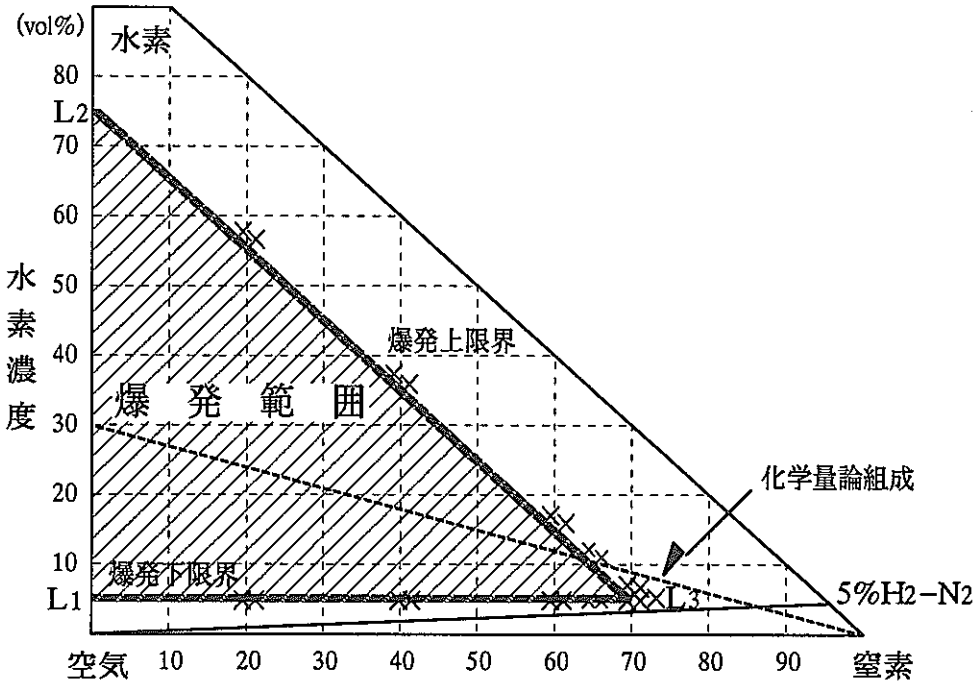
水素による爆発の防止方法としては，着火源を置かない，不燃性気体で水素を希釈するという２つの方法がある。しかし，前者の場合，爆発が静電気が着火源となって起こることもあるため対策は非常に困難である。このため，窒素等の不燃性気体で水素を希釈して用いる方法を用いている場合が多い。

2.3 水素－窒素混合ガス及び水素－Ar 混合ガスの爆発に対する安全性

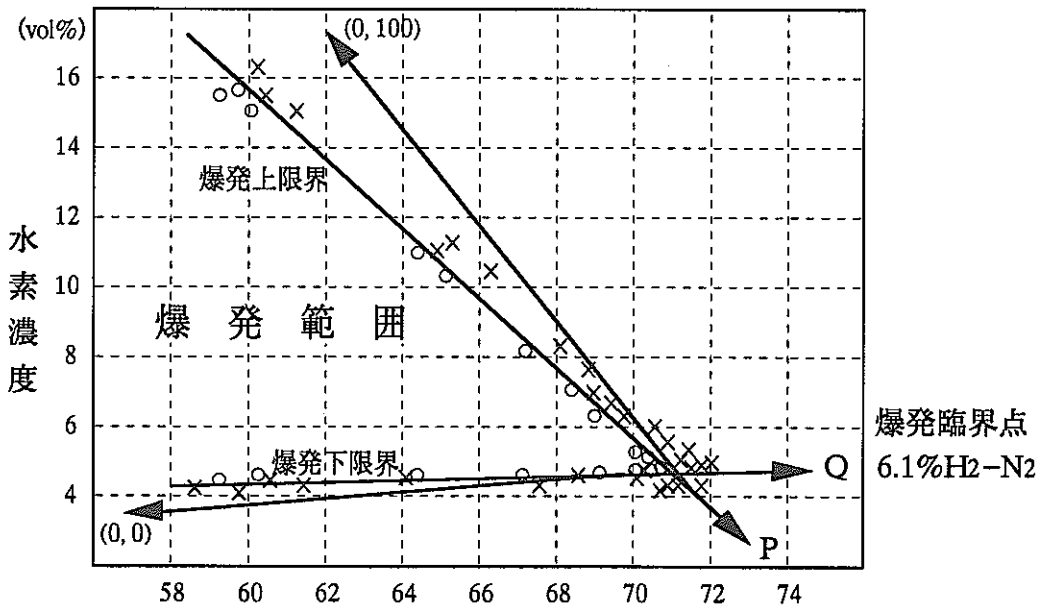
(1) 水素－窒素混合ガス及び水素－Ar 混合ガスの爆発範囲

はじめに，水素－Ar 混合ガスは，プルトニウム燃料第三開発室（以下「Pu3」という。）使用許可申請書においては，8%水素－Ar 混合ガスを使用するとして申請されているが，平成５年 10 月以降は 5%水素－Ar 混合ガスに変更しているため，本節では 5%水素－Ar 混合ガスで安全性を評価する。

Pu 工場の焼結設備で使用している焼結ガスは，水素を窒素や Ar 等の不燃性気体で希釈することで爆発に対する安全性を確保している。焼結ガスとしてはプルトニウム燃料第二開発室（以下「Pu2」という。）では水素－窒素混合ガスを，Pu3 では前述のように水素－Ar 混合ガスを使用している。水素を不活性ガスで希釈して用いる場合は表 2-1 のような単純な空気－水素の２成分系とは異なり，水素－空気－窒素（または Ar）の 3 成分系となり取り扱いはやや複雑になる。水素－空気－窒素系及び水素－空気－Ar 系の爆発範囲を図 2-1 及び図 2-2 に示す[4]。

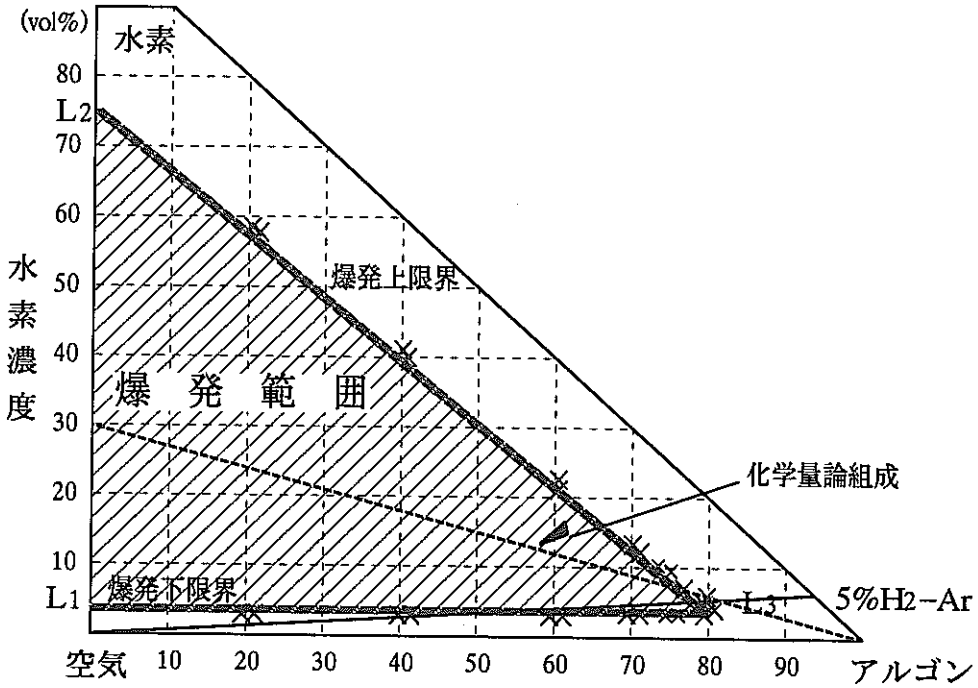


水素－空気－窒素３成分系の爆発範囲（常温、常圧）

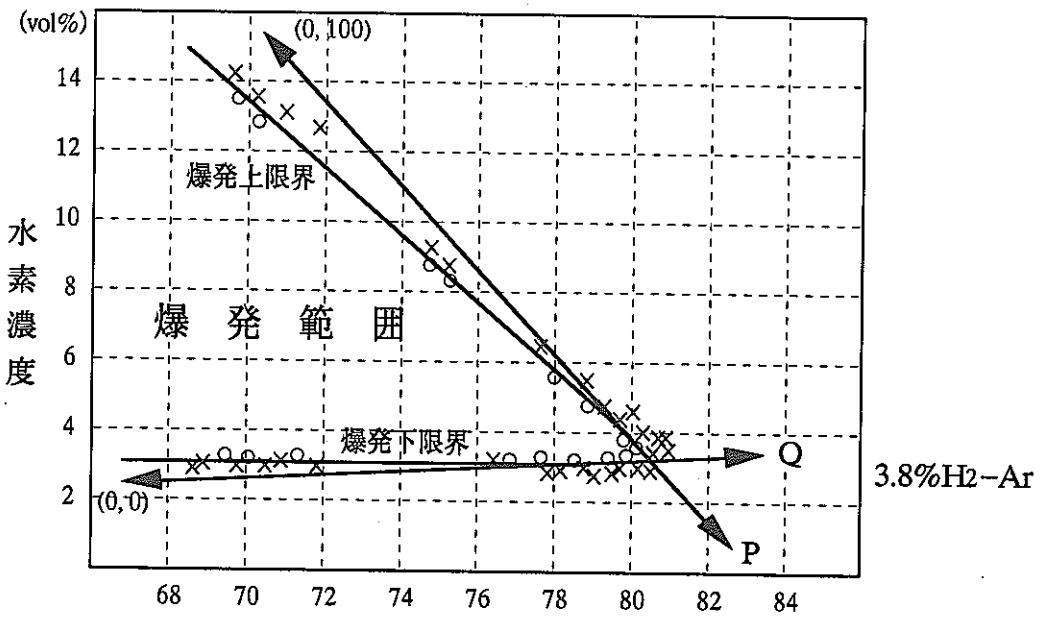


注）図中の○、×のプロット位置は傾向のみを示す。

図 2-1　水素－空気－窒素３成分系の爆発範囲
（爆発臨界点付近）



水素－空気－アルゴン３成分系の爆発範囲（常温、常圧）



注）図中の○、×のプロット位置は傾向のみを示す。

図 2-2　水素－空気－アルゴン３成分系の爆発範囲
（爆発臨界点付近）

図 2-1 によると水素－空気－窒素系の場合の常温，常圧における爆発下限水素濃度は 6.1%である。ここで注意することは，水素濃度が 6.1%を超える場合であっても酸素濃度が規定以上ないと爆発は起こらないことである。両方の条件が満たされて始めて爆発が起きる可能性が出てくる。この酸素濃度を爆発下限酸素濃度と言うが水素－空気－窒素系では 5.0%酸素である。したがって，水素－空気－窒素系では，水素濃度 6.1%以上，かつ，酸素濃度 5.0%以上の 2 つの条件が揃ってはじめて爆発の可能性が生じる。同様に，水素－空気－Ar 系では，水素濃度 3.8%以上，かつ，酸素濃度 3.4%以上の場合に爆発の可能性が生じる。

以上のように，水素－窒素混合ガスの方が水素－Ar 混合ガスより爆発の危険性ははるかに小さい。現在使用している 5%水素－窒素混合ガス（現実の水素濃度は供給側でノミナル 4.7%，管理上限 5.2%に管理している。炉への入り口においては 6%を炉停止レベルとして管理している。5%水素－Ar 混合ガスの場合も同じ水素濃度で管理している。）は空気との混合しても爆発の可能性はない。Ar で希釈するより窒素で希釈した場合の方が爆発下限濃度が高いのは，Ar と窒素の比熱差であり，比熱の大きい窒素の方が爆発のエネルギーを吸収しやすいことによる。

図 2-1，図 2-2 のデータから 5%水素－窒素混合ガス（NH ガス）及び 5%水素－Ar 混合ガスが空気と混合した場合の爆発の可能性の有無の検討結果を表 2-3 及び表 2-4 に示す。

表 2-3　5%水素－窒素混合ガスと空気が混合した場合のガス組成（単位%）

空気混入率	水素濃度	酸素濃度
100	0	21.0
78.7	1	16.5
57.4	2	12.1
36.2	3	7.6
23.8	3.6	5.0
14.9	4	3.1
0	4.7	0

（現実の水素濃度 4.7%で計算）

爆発の可能性がある酸素濃度範囲

表 2-4　5%水素－Ar 混合ガスと空気が混合した場合のガス組成（単位%）

空気混入率	水素濃度	酸素濃度
100	0	21.0
78.7	1	16.5
57.4	2	12.1
36.2	3	7.6
19.1	3.8	4.0
16.2	3.9	3.4
14.9	4	3.1
0	4.7	0

（現実の水素濃度 4.7%で計算）

爆発の可能性がある水素濃度範囲

爆発の可能性がある酸素濃度範囲

表 2-3 によると 5%水素－窒素混合ガスは，空気と混合しても爆発の可能性がないことが分かる。表 2-4 によると 5%水素－Ar 混合ガスではごく狭い範囲で爆発の可能性を生じる領域が存在する。

したがって，5%水素－Ar 混合ガスの場合は，爆発に対する管理が必要である。特に炉から出た排ガスがグローブボックス内に放出されてグローブボックスの空気と混合する部分でこの爆発組成になることが想定される。

Pu3FBR ラインの炉は当初，8%水素－窒素混合ガスを使用していたが，グローブボックスの空気と混合する部分で爆発組成となる部分には，着火源となるようなリレー等の電気部品等は設置しないようにしている。8%水素－窒素混合ガスが連続焼結炉からそのままグローブボックス内に放出される場合（焼結がほぼ終了した状態に排気されるガスの組成に相当し，供給時とほとんど変わらない組成のまま放出される。），爆発性の水素濃度になるのは，第 3 章及び参考文献[6]に示すように，放出口から約 40 cm程度の範囲である。5%水素－Ar 混合ガスではこの範囲はかなり狭まり，放出口から約 25 cm程度の範囲である。現実にはさらに火炎上方伝播等の条件も揃わないと爆発は起き得ないため，その可能性はほとんどない。

これらのことから Pu3FBR ラインの電気炉設備を設置しているグローブボックスでは，焼結ガスのグローブボックス内への放出口付近には，リレー等の着火源となるような電気部品は設置しないという設計管理を行っている。今後も新規に焼結

炉等を設置する場合，使用する焼結ガスの水素濃度，焼結ガス流量，放出口径から爆発組成となる範囲を計算し，その範囲内にはリレー等の着火源となるような電気部品を置かない設計が必要である。

以上のように5%水素－窒素混合ガスを使用しているPu2ATRラインでは供給される焼結ガスの水素濃度が管理されていれば爆発に対して安全である。Pu3FBRラインの場合は，現在は5%水素ガスを用いているが，申請書上は8%水素ガスで評価している。申請書においては8%水素ガスは爆発の可能性があるガスという前提で，供給側での濃度管理に加えて，炉の入口，出口での水素濃度管理，酸素濃度管理，排ガスのグローブボックス内への放出部の爆発水素濃度領域には着火源は置かない，炉の負圧管理等の制限が付けられている。

なお，Pu2の場合，規定濃度より水素濃度が濃い水素－窒素混合ガスが送られてくる場合には爆発の可能性が生じてくる。水素－空気－窒素系では，水素濃度6.1%以上，かつ，酸素濃度5.0%以上の場合に爆発の可能性が生じるという条件から混合ガスの水素濃度がどの程度になると爆発の可能性が生ずるかを計算してみると8.0%以上の水素濃度を有する混合ガスの場合にその可能性が出てくる。

(2) グローブボックス内水素濃度の管理値

電気炉を設置しているグローブボックス内の水素濃度は，水素が空気よりも軽く，グローブボックス天井側で濃度が高くなるため，天井側の気流が余りない位置で測定する。この管理値としては，水素－Ar 混合ガスを使用する場合は，爆発下限濃度の3.8%水素という値を基に，安全側に設定した水素濃度3%を炉運転停止値としている。なお，その1／3の値である1%を警報発報レベルに設定している。水素－窒素ガスの場合は，爆発下限濃度の 6.1%水素という値を基に，安全側に設定した5%を炉運転停止値としている。警報発報レベルは2%とする。なお，現実にはグローブボックス内の容積は焼結ガス流量に比べて大きく，排気された焼結ガスはグローブボックス内で希釈され水素濃度は著しく低くなり 0.1～0.2%の濃度が測定されているに過ぎない。

(3) 炉内での焼結ガスの爆発に対する評価

より高温で焼結ガスが空気と混合した場合は，前記の検討結果とは大きく異なった状況となる。温度と爆発限界の水素濃度を調べた実験例は僅かであり，水素－空気系において火炎の下方伝播における爆発限界を調べた実験例が確認できるのみである。その結果を図2-3[1)]に示すが，図2-3によると常温での爆発下限水素濃度が約9%であったものが，400℃では約6%まで低下している。

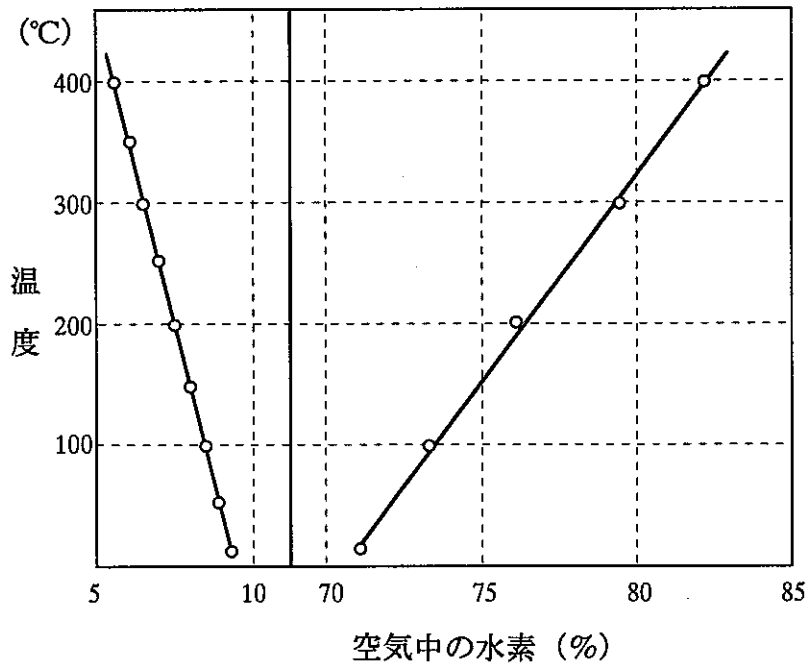


図 2-3　水素－空気系の下方伝播における温度と爆発限界の関係

この傾向がそのまま，今まで検討してきた火炎の上方伝播の場合に適用できるとは限らないが，上方伝播にも当てはまるとすると，爆発下限水素濃度は常温時の 2／3 程度の濃度まで低下することが考えられる。酸素濃度についてのデータはないが，同様に 2／3 程度の濃度まで低下すると仮定する（この仮定は産業安全技術協会の柳生昭三氏から妥当であるとのコメントを得ている。このことは図 2-1，2 において爆発範囲を示す網かけ部分が広くなることを意味する。）と，5%水素－窒素混合ガスの場合は，4%水素濃度，3.3%酸素濃度が爆発下限濃度となる。この条件から水素－窒素混合ガスの爆発下限水素濃度を逆算すると 4.75%となる。供給規定濃度が 4.7%であるので，この値より若干水素濃度が高いガスが供給される場合，爆発濃度組成を越えることになるが，火炎の上方伝播及び水素と空気の均一混合性という条件も必要なため，現実には爆発の心配はないと考えられる。また，後述するようにペレット，焼結皿も酸素ゲッターとして働くことも，安全側に作用する。このことはペレット装荷時の方が空焼時よりも爆発に対して安全側であることも意味する。

一方，5%水素－Ar 混合ガスに高温時における爆発範囲拡大の考えを適用すると，2.3%水素濃度，2.2%酸素濃度まで爆発下限が広がり，5%水素－Ar 混合ガスの場合はより厳しい管理が必要とされる。電気炉の運転中における爆発防止対策は，炉出口における酸素濃度を管理すればよい。5%水素－Ar 混合ガスの場合は，2.2%酸

素濃度が爆発下限であるため，安全側に2%（20000ppm）で管理していれば問題はない。しかし，現実には酸素濃度の管理値は爆発防止の観点ではなく，ペレットや焼結皿，ヒーター等の酸化防止の観点で決めている。この詳細は2.4で述べる。

炉内温度が600℃を越える場合は，爆発の心配はかえってなくなる。爆発は水素と酸素が均一に混合することにより起こるが，600℃以上という温度は水素の自己発火温度（着火源が無くても点火する温度）530℃を越えているため，炉にリークが生じて空気が炉内に入っても混合する前に水素と反応して水になってしまうからである。

現実にPu3FBRラインの旧焙焼還元炉（キルン炉）では，約650℃以上（キルン内部はより温度は低い。）で炉内の空気雰囲気を5%水素－Ar混合ガスで置換することにより，酸化雰囲気から還元性雰囲気に変えるという運転方法をとっていた。

この運転方法にした理由は以下のとおりである。火炎の水平伝播の場合は，最も爆発範囲が広い上方伝播に比べて爆発範囲が狭くなり，爆発下限水素濃度，酸素濃度はそれぞれ約1.6倍となる。したがってAr－水素－空気3元系では常温で6.1%水素，5.4%酸素が爆発下限濃度となる。高温ではこの濃度が2／3になると仮定すると，4.1%水素，3.6%酸素が下限濃度となる。この濃度は常温における上方伝播の場合の組成とほぼ一致する。

このため，偶然に表2-4がそのまま爆発評価に適用できる。表2-4に示すように，この場合は，ごく限られた範囲に爆発組成となる領域が存在する。水素の自己発火点以上の温度である650℃以上でキルン内の空気をAr－水素混合ガスで置換していたのは，空気中の酸素を混合ガス中の水素で部分燃焼させて置換させることにより爆発の防止を担保していたことになる。おそらく露点を計っていれば置換時に多くの水分放出が確認されたはずである。

一方，現在のPu2ATRラインの焙焼還元炉はキルン型である。ただし，Pu3FBRラインに設置していた焙焼還元炉のように1本のキルン内で空気と混合ガスの置換することで焙焼と還元を切り換えるタイプではなく，焙焼用と還元用に独立したキルンを持ち，それぞれのキルンに空気または混合ガスを流す方式としている。このため，ガスを置換する必要はなく，爆発に対する安全性はPu3FBRラインに設置していた炉に比べてはるかに高い。この炉の爆発に対する安全評価は還元用キルンで行う。

上記と同様の手法で評価を行うと，高温における火炎の水平伝播での爆発組成は常温における火炎上方伝播の場合とほぼ同じとなり表2-3の評価がそのまま適用できる。表2-3を見て明らかなように5%水素－窒素混合ガスを使用した場合はキルンを加熱している状態においても爆発組成にはならないとの結論が導かれる。

ただし，ユーティリティ側でガスの混合組成を誤り，8%以上の水素濃度の混合ガスがそのまま供給される場合には爆発の可能性が生じてくる。これに対しては炉の入り口において水素濃度を6%以下に管理しておけば問題ない。

2.4 電気炉の運転における爆発の可能性評価と酸素濃度管理の考え方

電気炉及びその周辺で爆発が起こる可能性としては，

① ユーティリティ側における水素濃度高，酸素濃度高が生じた場合
② ガス供給配管が破損，腐食し，空気が中にリークした場合
③ 炉体の破損
④ グローブボックス内の排ガス出口付近での着火
⑤ 電気炉冷却時の焼結ガスの供給停止

以上の5点が想定される。このうち，①についてはユーティリティ側の管理の問題であるが，水素ガスと窒素ガスあるいはArガスとを混合する時点で水素濃度を測定し，（水素－Ar 混合ガスではバッファタンクで再度，水素濃度を測定）管理上限の 5.2%を超えた場合，混合ガスの供給を止め，不活性ガスを供給するため，水素濃度が規定より高いガスが供給されることはありえない。なお，Pu3FBR ラインでは，炉への入口でも水素濃度，酸素濃度を測定する3重の管理を行っている。

②については，ガス配管のフランジ部等が工事ミス等で何らかの強い外圧を受けて密封性を失った場合及び配管が腐食した場合が想定される。しかし，電気炉運転中に工程室で工事等を行うことはなく，ガス配管に大きな資材等がぶつかって破損させることはありえない。

また，腐食等に関しては，配管材質がステンレス鋼であることと，供給ガスの露点が－70℃程度に管理され，ほとんど水分を含まないものであるため，配管内部から腐食が進行することはない。配管外部の腐食状況は目視により容易に確認できる。なお，Pu3FBR ラインでは，炉への入口で水素濃度，酸素濃度を測定しているため，リークが起きている事実は容易に把握できる。

③については，炉体に何かがぶつかり破損して炉内に大量の空気が入らない限り，その可能性は生じないが，実際にはこのようなことは想定できない。Pu2ATR ラインの炉は通常運転時には炉内はグローブボックス内や室内圧に対して，やや正圧となっているため，炉体にリークが生じ，炉内に空気が引き込まれてもその量はわずかであり問題はない。Pu3FBR ラインの炉は，グローブボックス内に対して，やや正圧となっているものの，室内圧に対してはやや負圧になっているため，多少は不利である。しかし，リークを起こす可能性が最も高い熱電対ホルダーに，シース型

を用いていること等のハードの対策により安全性を確保している。

④については，前節で検討したとおりであり，問題はない。

⑤は何らかの要因により，加熱中に焼結ガスが停止する場合であるが，降温中の供給停止が最も心配されるケースである。これは降温中は温度低下により炉内のガスが収縮し，炉内が著しく負圧となり，炉蓋のパッキン部から圧力差によりグローブボックス内の空気が徐々に炉内にリークすることにより，炉内の酸素濃度が高まるため心配される事象である。ただし，600℃以上では爆発の可能性はない。

しかし，焼結皿，ヒータ，リフレクター及びペレットは，酸化し，炉と製品に重大なダメージを与える。爆発の可能性が生じるのは 600℃以下の温度領域である。しかも，炉内容積の 10%以上空気が混入するという条件が必要である。また，炉内へ空気がリークした場合，炉内に装荷されている焼結皿，ペレット等が酸素ゲッターとして作用し，炉内の酸素濃度を低下させてしまうため，現実の危険性はさらに低下させることになる。もし，炉の降温中にガス停止等の事態が生じた場合は，炉の降温を停止し，炉をキープ状態にする方法もある。しかし，現実にはそのような冷静な対処は不可能であろう。

最も簡単な方法は，出口酸素濃度あるいは露点等を監視し，異常時に炉内へ不活性ガスである窒素を導入することである。出口酸素濃度の設定値としては，バッチ式焼結炉では 3000ppm を炉運転停止値に，1000ppm を警報発報値としている。3000ppm という値は，炉内に空気がリークしてモリブデン製の焼結皿が赤褐色に酸化した時の酸素濃度が 4000～5000ppm であったという事実を基に安全側に設定したものである。入口（供給側）酸素濃度と出口酸素濃度の差は，炉のリーク，ペレットからの放出によるものであるが，入口酸素濃度が高ければ必然的に出口酸素濃度を押し上げることになる。

従って供給側酸素濃度も低く管理する必要があり，1000ppm を炉運転停止値に 500ppm を警報発報値としている。連続焼結炉の場合は，バッチ式焼結炉とは異なり一度，高温まで温度を上げた後は降温せずに運転する方式をとる。したがって爆発や酸化防止の観点で酸素濃度を監視するのは昇温時のみである。連続焼結炉は内部にレンガを使用しており，停止中は水分，空気がレンガに吸着し，昇温時はこれが放出されるため，酸素濃度は高くなる。このため連続焼結炉の出口酸素濃度管理値はこれを考慮し 7000ppm に設定している。これらの設定値は，既に述べたように爆発防止という観点よりも，炉材とペレットの保護を念頭に置いたものである。爆発防止の観点から管理値を設定しようとすれば 2.3 で述べたように 22000ppm 以上の現実ばなれした値となる。この酸素濃度であれば炉材やペレットの酸化はかなり進み，炉やペレットは壊滅的なダメージを受ける。600℃以上の高温においては

出口酸素濃度の監視は爆発防止あるいは酸化防止の観点で意味がない。これは炉内にリークした空気中の酸素が瞬時に水素と反応して水になってしまい酸素濃度の上昇となって現れないからである。その代わり炉内への空気のリークは露点の上昇となって現れる。従って600℃以上の高温では露点を監視することでリークを検知する方法を取る。露点管理については2.5で述べる。バッチ式焼結炉において昇温中に出口酸素濃度が3000ppmを越えた場合，あるいは高温下で露点が異常に上昇した場合，炉内に窒素ガスを導入して酸素濃度，水素濃度を下げながら降温する措置を採る。

なお，窒素の代わりにAr，He等の不活性ガスを用いても良い。予備焼結炉のように余り高温で使用しない炉では，窒素の代わりにCO_2ガスで代用が可能である。（高温ではCO_2と水素が反応してCOと水の生成が多くなる。）窒素を導入する方法は自動であっても，警報が出てから手動で行っても可。たとえ誤操作により窒素が導入されても炉やペレットには損害は与えない。（精々，再焼結となる程度の影響しか与えない。）窒素供給系はユーティリティから供給できれば望ましい。工程室に窒素ボンベを置き，緊急時はこれから供給する方法でも可。

なお，窒素導入の判断を行うためには，リーク等を感知するため少なくとも出口側に酸素濃度計，露点計を設置しなければならない。（Pu3FBRラインの炉では入口側と出口側に酸素濃度計と水素濃度計が付けられている。なお，空気のリークがあっても，高温時には酸素濃度計の酸素濃度は上昇しない。リークした空気中の酸素は水素と反応して水となるので露点計の指示値が上昇する。低温の場合はこの逆となる。）以上の酸素濃度監視及び設定値の考え方を図2-4に示す。

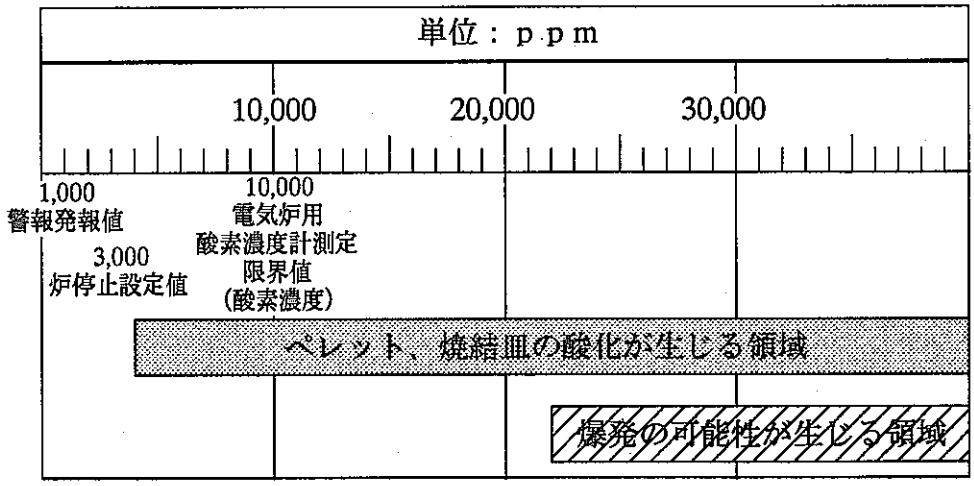


図2-4　酸素濃度監視及び設定値の考え方（600℃以下）

2.5 露点の管理について

電気炉内への空気のリークは，低温においては出口酸素濃度を監視していれば検知できるが，600℃以上ではリークした空気中の酸素が瞬時に水素と反応して水になってしまうので出口酸素濃度はほとんど変わらない状態であり，出口酸素濃度では管理できない。その代わりとして600℃以上では露点により空気のリークを検知する。しかし，露点による空気のリークの検知は現実には非常に困難である。もし，炉が空状態であれば露点の上昇は，そのまま空気のリークと考えてよい。しかし，ペレットが装荷されている場合は，ペレットの焼結過程（還元反応）で発生する水分がこれに加算されるため，その寄与分を考慮しなければならない。

(1) ヒータ，皿，レンガ保護の観点から見た露点管理

連続焼結炉のヒータ材や焼結皿として用いられているモリブデンは比較的酸化しやすい金属であるため，還元雰囲気，不活性雰囲気あるいは真空中での加熱用に使用条件が限定される。しかし，還元雰囲気中，不活性雰囲気中あるいは真空中であっても空気の混入がある場合，あるいは真空度が著しく低下する場合にはモリブデンは酸化し，ヒータや皿の寿命を縮めることが考えられる。連続焼結炉においては，出入口シャッターのOリングにゴミ等が付き，チャンバー内の真空度が上がらず，若干の空気が炉内に入る場合等にヒータ，皿の酸化が心配される。

以下の限界露点の検討は米国ＢＴＵ社のデータシートを参考に行う。図2-5に示すデータは比較的純度が低い水素－不活性ガス中の露点（dew point：雰囲気中の水蒸気が凝結して水滴となる温度）とモリブデン及びアルミナの使用可能範囲を示したものである。ここで右の線はモリブデンの使用限界ラインを示しており，線の右側ではモリブデンが酸化し，線の左側がモリブデンが健全である領域である。この図は一般に空気が巻き込まれれば高温のためモリブデンを酸化するより前にガス中の水素と反応し，水（水蒸気）となってしまうため，よほど大量の空気の巻き込みがない限りモリブデンヒータは健全であることを示している。ちなみに連続炉の均熱ゾーンの温度である 1600～1700℃においては露点が＋40℃程度の高水分領域（約5%H_2O)でもモリブデンは健全ということになる。逆に500℃程度の低温領域の方が水分に対するモリブデンの健全性が厳しくなり，500℃以下では露点が－5℃（約 4000ppm)が限界値となる。これは，雰囲気中の水素と酸素が反応して水になる反応度が低下するためである。

一方，アルミナレンガは著しい低水分領域下では高温で Al と酸素に分解する。この限界ラインを示したものが左側の線であり，アルミナはこの線の右側の領域であれば健全である。実際には供給ガスの露点が－70℃になることはなくアルミナの

粉化を考慮することは不要である。

以上まとめると，連続炉の出口ガスの露点は安全側に－10℃を上限に管理すれば，ヒータ及び皿の酸化は考えなくてもよいと思われる。なお，この－10℃という露点は均熱域でのヒータ酸化を考慮した値ではなく，特に冷却ゾーンでの皿の酸化を考慮した値であることは前に述べた通りである。炉内が1700℃程度になっている場合，ヒータのみの酸化を考慮するなら＋20～30℃でも問題はない。また，バッチ焼結炉は昇温時の露点が高くなる傾向があるが，冷却時の露点は低く皿が酸化することはない。（皿，ヒータが徐々にやせることは考えられる。）

(2) ペレット品質の観点からみた露点管理

焼結ガスの露点はペレットの品質，特にペレットの焼結特性に影響を与える。一般に焼結ガスを加湿し露点を高めるとペレットの焼結が進み，低温で高密度大粒径のペレットが得られると言われている。Siemensなどでは，焼結中に焼結ガスを最高4000ppm(露点で－5℃）まで加湿してPu－マル用MOXペレットを製造している。ただし，この場合，冷却ゾーンにも加湿ガスを流すと冷却中のペレットO／Mが変化するためマイクロクラックが発生し，外観に問題を生じるため，冷却ゾーンには乾燥ガスを流す必要があるとしている。

一方，PNCにおいては図2-5に示すように旧バッチ炉が比較的高露点下で運転されており，均熱温度の露点は－15～－20℃であり，この値は連続焼結炉に比べて10～15℃高い。これは水分量にすると1000～1800ppmに対して，400ppmという違いであり，旧バッチ炉の方が3～4倍も水分が多いということである。しかし，旧バッチ炉で焼結したペレットでマイクロクラックが顕著に発生したという事実はなく，分析値で異常が見られたということもない。以上より連続焼結炉の露点管理は次のように上限を設定しておけばペレットの品質上，全く問題はないと考えられる。

① 実スキッド搬入からロットの最後の実スキッドが均熱ゾーンに入るまで，空運転時……ピークで－10℃

② ロットの最後の実スキッドが均熱ゾーンから冷却ゾーンにある間……ピークで－15℃

③ ２つのロットが連続して炉内を搬送する場合……ピークで－15℃

なお，①～③の露点のめやすは安全側に設定したものであり，この露点でペレット品質が問題となることはないと考えられるが，今までの運転実績（初焼結時－25～30℃，再焼結，空時…－40～－45℃）からみて－10～15℃という露点になるのは炉体，シャッターらの空気の巻き込みが考えられるため，炉の保安の観点からはリーク部の確認，補修が必要と思われる。

〔参　考〕

露点と水分含有量

℃	水分含有量(ppm)
-60	3
-50	40
-40	130
-30	380
-20	1020
-10	2600
0	6000
10	12100
20	23000
30	42000

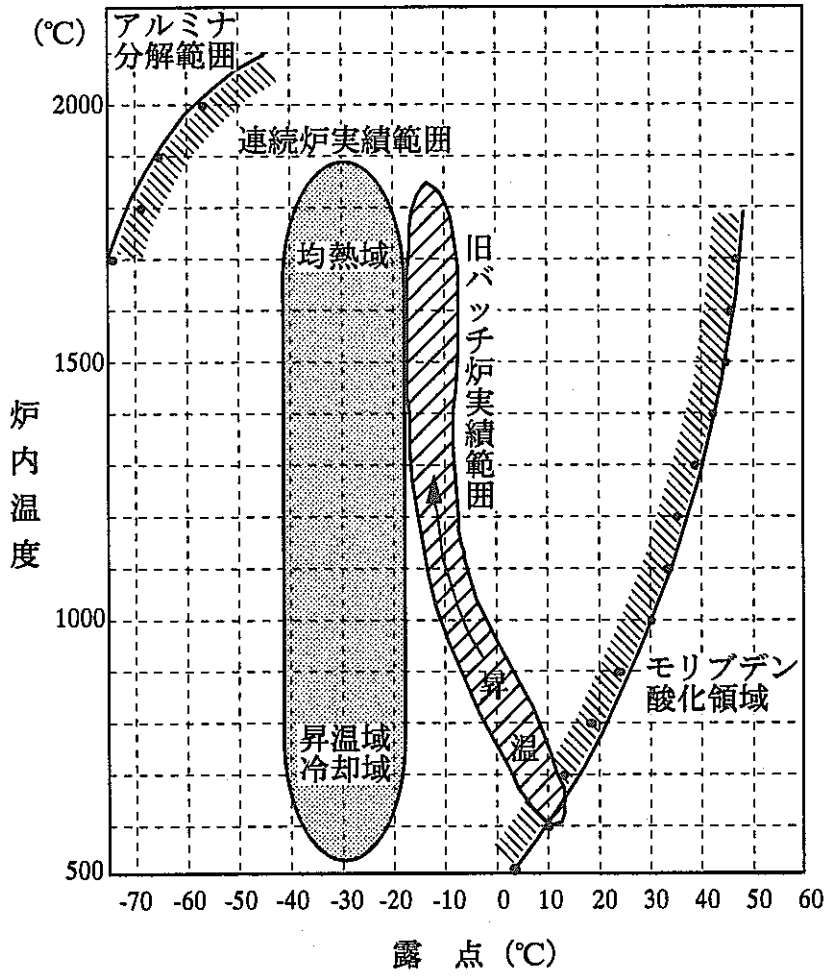


図 2-5　モリブデン・アルミナの使用可能露点（米国ＢＵＴ社資料より）

2.6 実際の電気炉運転等への検討結果の反映

(1) Pu2ATR ラインの予備焼結炉，焼結炉及び焙焼還元炉

水素－窒素混合ガスを使用しているため，爆発の可能性は少ない。水平炉である焙焼還元炉のほうが焼結炉より爆発に対してはより安全である。常温においては混合ガスの水素濃度が 8.0%以下であればいかなる場合も爆発の可能性は生じない。従って供給側で混合を誤らない限り問題はない。ただし，高温状態の炉内へ空気がリークした場合はより低い水素濃度で爆発が起こる可能性が生じてくる。理論的には混合ガスの水素濃度が 5%付近でも爆発が起こり得る。しかし，現実にはガスの混合均一性，上方伝播，ペレット，Ｍｏヒータ，皿，リフレクター等酸素ゲッターの存在等の要因を考慮する必要がある。このため爆発が起きる水素濃度はより高いはずである。従って，爆発よりはるかに少ない空気のリークで問題となる炉体，ペレット，焼結皿，ヒータ及びリフレクターの酸化に対する保護を目的に以下の措置を採ることが望ましい。

① 炉の出口に酸素濃度計，焼結炉においてはさらに露点計を設置して，酸素濃度の監視を行う。

② 緊急用として窒素ガスの導入。

(2) Pu3FBR ラインのバッチ式予備焼結炉，焼結炉

運転あるいは改造時には以下の点に留意する。

① 排ガスのグローブボックス内放出部近くに着火源となるものは置かない。

放出部付近で爆発組成となる領域はガス流量及び放出部口径により異なる。放出口から 50 cmを見ておけばほぼ問題はない。放出部口径は細いほどその範囲は狭くなる。ガス流量の多い炉ではグローブボックス内への放出部を分岐して，細い口径の管を複数付けたほうが爆発組成となる範囲は狭くなる。

② 炉への供給側，炉からの排気側の酸素濃度計，水素濃度計の校正，運転中における監視の強化

2.4 で述べたように爆発が起こる可能性が出てくる酸素濃度は 22000ppm 以上の濃度である。出口酸素濃度の警報設定値は 1000ppm，炉加熱停止設定値は 3000ppm であるので，炉昇温中の 1000℃以下ではこの設定値で管理すれば問題はない。なお，この設定値は爆発防止の観点で決めた値ではなく，炉材やペレットの保護が目的で決めた値である。3000ppm を越えたら窒素を導入して降温する。

また，600℃以上は露点で管理する。露点が－10℃を越える場合は窒素を導入して降温する。

③ ガス置換時の真空度変化の状況，置換時間のチェック

通常時に比べ，真空度の上昇速度が遅い場合はリーク等の可能性が懸念される。その場合は，フランジ等のチェック，パッキンのグリスアップ等が必要である。

④ 炉運転時は600℃以下の領域を注意すること。

(3) Pu3FBRラインの連続焼結炉

連続焼結炉の運転においては，既に平成5年10月にそれまで使用していた8%水素－Ar混合ガスから，より爆発の可能性が低い5%水素－Ar混合ガスに変更している。さらに運転方法についても900℃まで窒素雰囲気下で加熱を行い，その後，水素－Ar混合ガスに切り換える方法に変更している。これは炉材にレンガを使用しており，レンガを長期間，放置していると空気や水分が吸着し，加熱中に放出され，酸素濃度が高まるためである。この場合，始めから8%水素－Ar混合ガス雰囲気下で加熱すると爆発が起こる可能性が増大するためである。ドイツにおいてはこの方法で爆発が起きたということである。

なお，炉の立ち下げ時も窒素雰囲気で冷却を行っている。通常運転時で注意する場所は，1000℃以上となっている炉体部ではなく，出口側の冷却ゾーンである。これは冷却ゾーンが600℃以下の温度となっているためである。このため，出口側のシャッターあるいはガス供給配管からリークがある場合は冷却ゾーンで爆発組成となることが考えられる。なお，現実にはシャッターからリークがあっても，炉内はグローブボックス内よりは加圧状態となっているため炉内に大量の空気が巻き込まれることはない。平成5年4月6日に出口シャッター2枚が同時に開くというトラブルがあった。この時は出口露点計は最高0℃まで上昇した。0℃という露点は，水分量にすると6000ppmである。炉内にリークした空気中の酸素が水素と反応して水になったため6000ppmの水分はそのまま6000ppm（0.6%）の酸素が炉内へリークしたということになる。この量であっても爆発下限酸素濃度の数分の1にすぎない量である。出口側のシャッターからの大量のリークが懸念される場合は，炉内へ窒素ガスを導入し，酸素濃度，水素濃度を低下させる。

(4) Pu3FBRラインの焙焼還元炉

新焙焼還元炉は，縦型であり，万が一，爆発が起きる場合は火炎の伝播形態とし

ては上方伝播も想定される。このため，炉内の空気雰囲気を窒素で一旦置換した後に5%水素－Arガスを導入する制御方法としている。

なお，本炉は炉材にハステロイ合金等耐酸化性の材質を用い，資材を酸化させることを目的としたものであるため，炉材の酸化を考慮する必要はない。

したがって，本炉は純粋に爆発のみに対する酸素濃度，水素濃度の管理を行う。運転に当たっては，水素濃度，酸素濃度の管理基準に従い，異常時には炉内に窒素ガスを導入する方法を取る。

2.7 電気炉爆発時のグローブボックス負圧に及ぼす影響について

ここでは，電気炉内で爆発が生じた場合，グローブボックスの負圧にどの程度の影響があるか評価する。

検討対象とする電気炉は，電気炉の内，最も内部容量が大きいバッチ式予備焼結炉とする。当該炉の内部で爆発が起きると内圧は1.5気圧に上昇する。なお，爆発時の温度は500℃とする。爆発で上昇した炉の圧力は，炉の上蓋から瞬時にグローブボックス内に伝達されるとする。バッチ式予備焼結炉の内容積は，装荷物や炉部材を除外して約1.5 m³である。爆発時の気圧は1.5気圧に上昇するが，その内，0.5気圧分に相当する気体が炉外に放出される。この気体は放出の瞬間には500℃の温度であるが，グローブボックス内温度は20℃程度であるため，瞬時に冷却される。

したがって，500℃で0.5気圧分に相当する気体体積である1.5 m³の放出ガスが室温まで冷却された場合は0.25 m³分の気体の放出にしか相当しないが，安全側に直ぐに冷却されず，2倍の0.5 m³分の気体が放出されるという安全側の想定を行う。

一方，バッチ式予備焼結炉を設置しているグローブボックスは，上部の搬送グローブボックスを含めて約33 m³の体積がある。グローブボックス内は通常，室内圧より30mmAq負圧となっている。室内圧を1気圧（1033mmAq）とするとグローブボックス内の圧力は，約1000mmAqである。今，33 m³の体積を有するグローブボックス内に，さらに0.5 m³分の気体が付加されたとすると，グローブボックス内容積は不変であるため，圧力の増加として現れる。圧力の増加率は，33.5／33＝1.015である。したがって，グローブボックス内圧力は，1000×1.015＝1015mmAqとなる。この値は負圧が15mmAqに低下することを意味しており，決して正圧にはならないことを意味している。

なお，以上の評価はグローブボックスが完全に密閉された状態と仮定して計算を行っている。現実にはグローブボックス内は排風機で引かれており，保管庫グローブボックスと完全に遮断されていないため，負圧の低下はさらに小さいものとなる。

第3章　炉から水平方向に放出される排ガスによるグローブボックス内の水素濃度に関する考察
～ベントから水平方向に放出されるガスの広がりに関する考察～

3.1　目　的

ベントから放出された可燃性ガスが、どのように広がり、どのように滞留するかを知ることは、可燃性ガスを取り扱う上で大切である。大気中に放出されたガスは、放出時に持っている運動量および大気の乱れ（主に風）により周囲の空気と混じり合い希釈される。この時、放出口の近くでは放出時にガスが持つ運動量による希釈が支配的であり大気の乱れによる希釈が従属的である。放出口から離れるに従いこの関係は逆転する。放出口の近くでも大気に乱れがあればより早くガスは希釈されるから、大気に乱れがない場合（一般的には無風時）にガスを放出した時が最も危険範囲が広くなり、防災上問題となる。[2),3)]

Pu3でも、焼結工程において可燃性ガスである水素を使用しているため、炉からグローブボックス内に排出される排ガスに関して、どのように広がるかを把握しておくことは非常に有益である。そこで、今回は連続焼結炉から排ガスが水平方向にグローブボックス内に排出される場合を想定し、ガスの広がりについてシミュレーションを行ったので、その結果について報告する。

3.2　水素混合ガスの安全性[4),5)]

Pu3の焼結工程では、可燃性ガスである水素を不活性ガスであるArで希釈した混合ガスを使用している。ユーティリティ施設から供給されるこの混合ガスの比率は、4.7%H_2-95.3%Arとなっている。しかし、第2章に述べたように、この混合ガスの濃度が1の状態（混合ガス100%の雰囲気）では、水素の爆発は起こらない。これは、水素自体は爆発せず、必ず適量の酸素等の酸化剤と均一に混合した場合のみに爆発が起こるためである。したがって、Pu3の焼結設備（連続炉）でガス爆発を論ずる場合には、排ガスが空気と混じり合う場合、換言すれば炉からの排ガスがグローブボックス内に放出された後のことについて検討すればよいことになる。

第2章の表2-4に示すように水素－空気－Ar 3成分系では爆発の可能性がある範囲が存在する。また、以前使用していた8%H_2-92%Arガスが空気と混入した場合の結果を表3-1に参考として示す。

表 3-1　8%H_2-92%Ar 混合ガスと空気が混合した場合のガス組成（単位：%）

空気混入率	水素濃度	酸素濃度
100.00	0	21.0
87.5	1	18.375
75.0	2	15.75
62.5	3	13.125
52.5	3.8	11.025
50.0	4.0	10.5
37.5	5.0	7.875
25.0	6.0	5.25
16.2	6.7	3.4
12.5	7.0	2.625
0	8.0	0

注）

	爆発の可能性がある水素濃度範囲
	爆発の可能性がある酸素濃度範囲

表 2-4 によるとごく狭い範囲ではあるが爆発の可能性を生じる領域が存在する。

ただし、4%という爆発下限濃度は、爆発発生条件の最も厳しい上方伝播を適用した場合の値である。実際の連続炉は水平方向への排出であることから、下限濃度は約 6%となり、この条件では爆発は起こらないことになる。

3.3　放出ガス濃度計算モデル [2), 3), 6)]

ノズルより水平方向へ放出したガスが空気より重い場合、ガスは徐々に広がりながら放物線を描いて下降する。この流れの様子を図 3-1 に示す。

以下に示すガス濃度分布の式は、図 3-1 に示す座標軸の中で論じる。

(1)　噴出流の中心軸の軌跡

噴出ガスの濃度が最高の点を結ぶ曲線を濃度軸と定義すると、濃度軸の描く軌跡は次の式で与えられる。

$$y=\frac{2}{9}g\left(\frac{\rho_0-\rho_a}{\rho_0}\right)\left(\frac{\rho_a}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{1}{u_0{}^2k_1d}\left(x+k_1d\,\frac{\rho_0{}^{\frac{1}{2}}-\rho_a{}^{\frac{1}{2}}}{\rho_a{}^{\frac{1}{2}}}\right)^3 \qquad (3.1)$$

ここで(3.1)式の各記号は以下のことを示しているとする。

g ：重力の加速度
ρ_0 ：放出ガスの密度
ρ_a ：空気の密度
u_0 ：放出ガスの初速度
k_1 ：レイノルズ数によって決まる係数であり Re をレイノルズ数とすると、次式で与えられる。

$$k_1 = 0.5645 \ln \mathrm{Re} - 0.5202 \quad (\mathrm{Re} < 30000)$$
$$= 5.3 \quad (\mathrm{Re} \geq 30000) \qquad (3.2)$$

d ：放出口の直径

x が放出口から十分離れれば、x は $k_1 d(\rho_0^{1/2} - \rho_a^{1/2})/\rho_a^{1/2}$ に比べて十分大きくなるため、

$$y = \frac{2}{9k_1}\frac{d}{F_r}\frac{x^3}{d^3} \qquad (3.3)$$

となる。ここで、F_rは以下の式で与えられるものとする。

$$F_r = \frac{\rho_0^{2/3} u_0^2}{\rho_a^{1/2}(\rho_0 - \rho_a) g d} \qquad (3.4)$$

このF_rはフルード数と呼ばれ、運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの比、あるいは慣性力と重力の比に関連する無次元量である。なお、式(3.4)のF_rは浮力の修正を行っている。

なお、(3.3)式中の$\frac{2}{9k_1}\frac{d}{F_r}\frac{1}{d^3}$を A と定義すると(3.3)式は次のように表される。

$$y = Ax^3 \qquad (3.5)$$

(2) 濃度軸上のガス濃度

鉛直下方に放出したガスの放出軸上のガス濃度C_xは、次式で表される。

$$\frac{C_{x0}}{C_0} = \frac{k_1 d}{x}\left(\frac{\rho_{x0}}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3.6)$$

ここで(3.6)式の各記号は以下のことを示しているとする。

C_{x0} ：放出口から距離 x における濃度軸上のガス濃度

C_0 ：ガスの初濃度
ρ_{x0} ：放出口から距離 x における濃度軸上のガス密度

水平方向に放出した時、濃度軸上の濃度は放出口付近を除き(3.6)式の値よりも小さい。濃度軸上のガスはこの軌跡に沿って流れる過程で、空気と混じり合うと考えればx の代わりに軌跡長 ℓ を入れればよい。

$$\frac{C_{L0}}{C_0} = \frac{k_1 d}{\ell}\left(\frac{\rho_{L0}}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3.7)$$

ここで(3.7)式の各記号は以下のことを示しているとする。

C_{L0} ：放出口から距離 x における濃度軸上のガス濃度
ρ_{L0} ：放出口から距離 x における濃度軸上のガス密度
ℓ ：軌跡長

このρ_{L0}は放出口近くでは$\rho_{L0} = \rho_0$となり、無限遠方では$\rho_{L0} = \rho_a$となる。工学的に安全側で評価するならば、$\rho_{L0} = \rho_a$とするのが望ましい。

(3.7)式の ℓ は次式で与えられる。

$$\ell = \int_0^x \sqrt{1 + (dy/dx)^2}\, dx \qquad (3.8)$$

(3.5)式より $\frac{dy}{dx} = 3Ax^2$ となるからこれを(3.8)式に代入して次式を得る。

$$\ell = \int_0^x \sqrt{1 + 9A^2x^4}\, dx \qquad (3.9)$$

(3.9)式のような定積分は、定積分の近似値を数値積分で求める方法であるシンプソンの公式等が用いられる。シンプソンの公式を以下に示す。

（補足：シンプソンの公式）
$y = \int_a^b f(x)dx$ に対し、区間$[a,b]$を 2n 等分したきざみを h として
$x = a, a+h, a+2h, \cdots, a+2nh = b$ での$f(x)$の値をそれぞれ$f_0, f_1, \cdots, f_{2n}$とすれば、
$\frac{h}{3}\left\{(f_0 + f_{2n}) + 4(f_1 + f_3 + \cdots + f_{2n-1}) + 2(f_2 + f_4 + \cdots + f_{2n-2})\right\}$
で近似値が与えられる。

(3) 濃度分布

鉛直下方に放出したガスの放出軸周囲のガス濃度は次式で与えられる。

$$\frac{C_{xr}}{C_{x0}} = \exp\left[-\left(\frac{k_2 r}{x}\right)^2\right] \qquad (3.10)$$

ここで(3.10)式の各記号は以下のことを示しているとする。

C_{x0} ：放出口から距離 x における濃度軸上のガス濃度
C_{xr} ：放出口から距離 x における濃度軸上の法線方向へ距離 r 離れた点でのガス濃度
r ：濃度軸から法線方向への距離
k_2 ：定数であり空気の場合 7.5

水平方向に放出した時、濃度軸上の濃度は放出口付近を除き(3.10)式の値よりも小さい。濃度軸上のガスはこの軌跡に沿って流れる過程で、空気と混じり合うと考えれば x の代わりに軌跡長 ℓ を入れればよい。

$$\frac{C_{LR}}{C_{L0}} = \exp\left[-\left(\frac{k_2 r}{\ell}\right)^2\right] \qquad (3.11)$$

ここで(3.11)式の記号は以下のことを示しているとする。

C_{LR} ：濃度軸（放出口からの距離 ℓ ）の法線方向へ距離 r 離れた点でのガス濃度

ただし、ガス放出口付近においては(3.11)式では、$C_0 < C_{LR}$ となり矛盾が生じるため、この場合には $C_0 = C_{LR}$ とする。

以上をまとめると、水平方向に排ガスを放出した時の濃度分布は次式で与えられる。

$$\frac{C_{LR}}{C_0} = \frac{k_1 d}{\ell}\left(\frac{\rho_{L0}}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\left(\frac{k_2 r}{\ell}\right)^2\right] \qquad (3.12)$$

なお、前述のように(3.12)式を工学的に安全側に設定して考えるならば、$\rho_{L0} = \rho_a$ とする方がよい。

(4) 濃度軸から距離 r の座標

濃度軸上の点（x,y）から法線方向に距離 r だけ離れた点の座標をそれぞれ（ζ_1, η_1）、（ζ_2, η_2）としたとき（図 3-2 参照）、これらは以下に示す連立方程式を解くことにより求められる。

$$r^2 = (\zeta_1 - x)^2 + (\eta_1 - y)^2 \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned} \eta - y &= -\frac{dy}{dx}(\zeta - x) \\ &= -\frac{1}{3Ax^2}(\zeta - x) \end{aligned} \tag{3.14}$$

その結果は次の通りである。

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= \frac{3Ax^2 r}{\sqrt{9A^2x^4 + 1}} + x \\ \eta_1 &= -\frac{\zeta_1 - x}{3Ax^2} + Ax^3 \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned} \zeta_2 &= -\frac{3Ax^2 r}{\sqrt{9A^2x^4 + 1}} + x \\ \eta_2 &= -\frac{\zeta_2 - x}{3Ax^2} + Ax^3 \end{aligned} \tag{3.16}$$

(5) 出口形状による補正[6]

前述のモデルは突出ノズルから放出されるガス濃度の分布を与える計算であり、この場合はノズル後方からの空気の巻き込みによる希釈効果が考慮されている。一方、ノズルが壁から突出してない場合、すなわち壁面に開いたベントからガスが放出される場合には、空気の巻き込みによる希釈効果が少なくなるので、ガスの濃度に補正係数を掛ける必要が出てくる。この場合の補正係数は、1.3 であるため、濃度軸上の濃度C_{L0}に 1.3 を掛けた $1.3C_{L0}$が、放出口から距離 x における濃度軸上のガス濃度となる。

3.4 ガス拡散のシミュレーション条件

ガス濃度のシミュレーションを行う時に設定するパラメータの種類とその設定値を表 3-2 に示す。なお、表 3-2 に示した各パラメータの中で、任意に設定できるものは、

① 放出ガス組成

② 無限遠方のガス組成

③ 放出管直径
④ 放出管本数
⑤ ガス流量
⑥ 放出ガス温度
⑦ 無限遠方のガス温度

の7項目である。

表3-2のNo.0は、実際の連続炉における各値を示している。ただし、放出ガスの組成は厳密には4.7%H2-95.3%Arではないと考えられる。また、ガス流速も計算値であり、測定値ではない。さらに放出ガスの温度も測定していないため、ブランクとした。

放出ガス組成、無限遠方のガス組成を決めると、各々の混合ガスの密度と粘性係数を求めることができる。今回は、各組成に応じた比例計算を行って求めた。なお、粘性係数は、レイノルズ数を求めるときに必要となる値である。表3-2で使用した各ガスの密度と粘性係数を表3-3に、参考として粘性係数と温度の関係を示したグラフを図3-3, 4, 5, 6, 7に示す。

表 3-2　パラメータ設定値

No.	放出ガス組成	無限遠方のガス組成	放出管直径 (mm)	放出管本数	放出口総面積 (m^2)	ガス流量 (m^3/h)	ガス流速 (m/s)	放出ガス温度 (℃)	無限遠方のガス温度 (℃)	対応する　図
0	4.7%H_2-95.3%Ar	0.2%H_2-99.8%Air	40.6	1	1.295×10^{-3}	9.72	2.54			
1	4.7%H_2-95.3%Ar	0.2%H_2-99.8%Air	40.6	1	1.295×10^{-3}	9.72	2.54	60	30	図 3-8
2	4.7%H_2-95.3%Ar	0.2%H_2-99.8%Air	40.6	1	1.295×10^{-3}	9.72	2.31	30	30	図 3-9
3	8%H_2-92%Ar	0.2%H_2-99.8%Air	40.6	1	1.295×10^{-3}	9.72	2.54	60	30	図 3-10
4	8%H_2-92%Ar	0.2%H_2-99.8%Air	40.6	1	1.295×10^{-3}	9.72	2.31	30	30	図 3-11
5	4.7%H_2-95.3%Ar	0.2%H_2-99.8%Air	81.2	1	5.178×10^{-3}	9.72	0.64	60	30	図 3-12
6	4.7%H_2-95.3%Ar	0.2%H_2-99.8%Air	7.1	12	4.751×10^{-4}	9.72	6.93	60	30	図 3-13
7	4.7%H_2-95.3%Ar	0.2%H_2-99.8%Air	9.4	9	6.246×10^{-4}	9.72	5.27	60	30	図 3-14
8	4.7%H_2-95.3%Ar	0.2%H_2-99.8%Air	12.7	7	8.867×10^{-4}	9.72	3.71	60	30	図 3-15
9	4.7%H_2-95.3%Ar	0.2%H_2-99.8%Air	16.1	6	1.221×10^{-3}	9.72	2.70	60	30	図 3-16
10	4.7%H_2-95.3%Ar	0.2%H_2-99.8%Air	21.4	5	1.798×10^{-3}	9.72	1.83	60	30	図 3-17
11	4.7%H_2-95.3%N_2	100%air	40.6	1	1.295×10^{-3}	9.72	2.54	60	30	図 3-18
12	100%CO_2	100%air	40.6	1	1.295×10^{-3}	9.72	2.54	60	30	図 3-19

表 3-3　各構成ガスの密度と粘性係数

ガス種類	密度 (kg/m³)			粘性係数 (kg/m・s)	
	0℃、1atm	60℃、1atm	30℃、1atm	60℃、1atm	30℃、1atm
水素	0.0899	0.0737	0.0731	956×10^{-8}	900×10^{-8}
アルゴン	1.78	1.459	−	248×10^{-7}	230×10^{-7}
窒素	1.25	1.025	−	192×10^{-7}	180×10^{-7}
二酸化炭素	1.977	1.623	−	164×10^{-7}	151×10^{-7}
空気	1.293	−	1.165	−	−

3.5　ガス拡散のシミュレーション結果

ガス濃度のシミュレーションの結果を図 3-8～19 に示す。シミュレーションの条件とその結果は、表 3-2 に示したNo. 1 の条件と図 3-8 が対応し、以下同様にNo. 12 の条件と図 3-19 まで対応するようになっている。なお、図中の等濃度曲線上の数字は放出ガス濃度を示しており、例えば放出ガスが 4.7%H_2-95.3%Ar の場合には、0.1 の等濃度曲線上のガス濃度が初期値の 10%（0.47%H_2）にまで減少していることを示している。

(1)　4%濃度長さ

水素－空気－Ar の 3 成分系において、約 4%H_2以上の水素濃度の領域は、爆発可能領域となるため、着火源となるようなリレー等の電気部品等を設置しないようにする必要がある。シミュレーションの結果判明した、4、3、2、1%（8%H_2-92%Ar の場合は、8～1%）のそれぞれの水素濃度に達する x 軸方向の長さをまとめたものを表 3-4 に示す。なお、シミュレーション条件は表 3-2 に準じるものとする。

表 3-4　各水素濃度到達距離

シミュレーション No.	水素濃度						
	7%	6%	5%	4%	3%	2%	1%
1				0.249	0.331	0.495	0.943
2				0.237	0.316	0.470	0.862
3	0.245	0.286	0.343	0.429	0.570	0.838	1.448
4	0.234	0.237	0.327	0.408	0.539	0.775	1.254
5				0.402	0.486	0.608	0.830
6				0.039	0.052	0.079	0.157
7				0.052	0.070	0.104	0.208
8				0.070	0.093	0.140	0.279
9				0.088	0.117	0.175	0.348
10				0.115	0.153	0.229	0.439

（単位：m）

(2)　濃度分布

①　放出ガス温度の違いによる濃度分布の違い（図 3-8 と図 3-9 の比較）

他の条件を変えずに放出ガスの温度を 60℃から 30℃に下げた場合、放出ガスの初速度が約 0.2 m/s 遅くなり、水平方向距離にして約 60 cm以上のところでの濃度軸の立ち下がりが大きくなる。4%H_2 濃度到達距離は、60℃の場合よりも 30℃の場合の方が約 1 cm短くなる。

②　放出ガス組成の違いによる濃度分布の違い（図 3-8 と図 3-10 の比較）

放出ガスの水素濃度を 4.7%から 8%に上げた場合、ガスの密度が軽くなるため濃度軸の立ち下がり方が少し緩くなる。4%H_2 濃度到達距離は 8%H_2-92%Ar ガスの方が 4.7%H_2-95.3%Ar ガスに比べて約 1.7 倍長くなる。

③　ガス放出管直径の違いによる濃度分布の違い（図 3-8 と図 3-12 の比較）

ガス放出管の直径を 2 倍にした場合、放出ガスの初速度が約 1/4 になるため、濃度軸の立ち下がり方は急になる。また、このときの 4%H_2 濃度到達距離は、放出ガスの運動量が小さくなるため約 1.6 倍にのびる。

④　ガス放出管直径、本数と濃度分布の関係（図 3-8、13、14、15、16、17 の比較）

ガス放出管の形状をϕ 7.1 mm×12 本にすると、ϕ 40.6 mm×1 本（実際の連続炉の形状）のときと比較して、放出ガスの初期速度が約 2.7 倍になり、ガスの持つ運動量が大きくなった結果、濃度分布もほぼ一直線になる。これは、希釈効果のほとんどがその運動量によるものであることを示している。4%H_2 濃度到達距離も約 4 cmとなり、ϕ 40.6 mm×1 本のときに比べて約 1/6 と短くなる。

ガス放出管の形状をφ 9.4 mm×9本にして放出ガスの初期速度をφ 40.6 mm×1本の場合の約2.1倍に設定すると、ガスの持つ運動量による拡散効果の他に大気の乱れによる拡散効果の傾向も見られるようになる。また、4%H_2濃度到達距離は約5 cmとなる。

ガス放出管の形状をφ 12.7 mm×7 本にして放出ガスの初期速度をφ 40.6 mm×1本の場合の約1.5倍に設定すると、大気の乱れによる拡散効果が顕著になってくる。また、4%H_2濃度到達距離は約7 cmとなる。

ガス放出管の形状をφ 16.1 mm×6 本にして、放出ガスの初期速度をφ 40.6 mm×1本の場合の約1.1倍と変化させないようにしても、ガスの拡散の濃度分布はφ 40.6 mm×1 本の場合と比べて大きく異なり、短い距離で拡散が終了する。これは放出管直径、レイノルズ数およびフルード数が変わって(3.5)式中の定数Aの値が大きく変わったためである。なお、4%H_2濃度到達距離は約9 cmとなる。

ガス放出管の形状をφ 21.4 mm×5 本にして、放出ガスの初速度をφ 40.6 mm×1本の場合の約70%にしても、ガスの拡散はφ 40.6 mm×1 本の場合と比べて早く終わる。なお、4%H_2濃度到達距離は約12 cmとなる。

⑤ ガスの種類と濃度分布の関係(1)（図3-8と図3-18の比較）

放出ガスを4.7%H_2-95.3%N_2に変更すると、混合ガスの密度が空気よりも重くなるため、濃度分布は上向きになる。また、4%H_2濃度到達距離は約29 cmとなり、4.7%H_2-95.3%Arの場合と比較して約4 cm長くなる。ただし、第2章に述べたようにN_2ガスはArガスと比較して比熱が大きいため、H_2ガスをArで希釈したときと比べて爆発下限濃度が高い。このため、常温、常圧での4.7%H_2-95.3%N_2と空気の混合では、いかなる場合でも爆発の可能性はない。

⑥ ガスの種類と濃度分布の関係(2)（図3-8と図3-19の比較）

図3-19はCO_2ガスの場合であり、水素は含まれていないので爆発を考慮する必要はないが、参考として比較する。CO_2ガスの場合、4.7%H_2-95.3%Arと比較して密度が大きくなるため、濃度軸の立ち下がりはやや急になる。それ以外は大きな違いはないといえる。

3.6 ガス拡散のシミュレーション結果の考察

(1) 4%H_2濃度到達距離

現在の連続炉のベントの形状では、4%H_2濃度到達距離は約25 cmとなる。これは、グローブボックス内を無風状態（最も安全側の設定）と仮定した場合の結果であり、実際はもっと短くなると思われる。ただし、前提条件として放出ガスの温度を60℃としているため、実際の温度によっては4%H_2濃度到達距離は前後する。

約4%H_2以上の水素濃度の領域は、爆発可能領域となるため、着火源となるよう

なリレー等の電気部品等を設置しないようにする必要がある。このシミュレーションの結果から、ベントから水平方向に 50 cm、ベントを中心に上下左右各 25 cmの立方体のエリアに着火源がなければ爆発の可能性は限りなく低くなるといえる。

(2) 効果的なガスの希釈方法

ガスの希釈を効率的に行うには、放出管の直径を小口径にして、本数を多数使用して放出する方がよい。

これは、放出管の直径が小さくまた放出管本数が多い方が、同じ水平距離でも濃度軸の軌跡長が長くなったり、(3.5)式中の定数Aが大きくなる等ガスが拡散しやすい方向に働くためである。

本シミュレーションの結果は、計算によって得られたものであり、実際のガス拡散の場合に比べて、安全側（過大）評価となっている。より精密なデータを得る必要がある場合は、実測を行い、シュミレーションの結果と比較することが望ましい。

3.7 まとめ

炉から水平方向に放出される排ガスによるグローブボックス内の水素濃度に関するシミュレーションを実施した。その結果をまとめると以下のようになる。

(1) 現在の連続炉のベントの形状の場合、4%H_2濃度到達距離は約 25 cmとなる。よって、ベントから水平方向に 50 cm、ベントを中心に上下左右各 25 cmの立方体のエリアに着火源がなければ爆発の可能性は限りなく低くなる。また、実際のグローブボックスには、そのエリアには何もないことが確認されている。

(2) 今後、新たに炉設備を設計する場合、効果的に排ガスの拡散を行うために、放出口を小口径にし、本数を増やす方がよい。

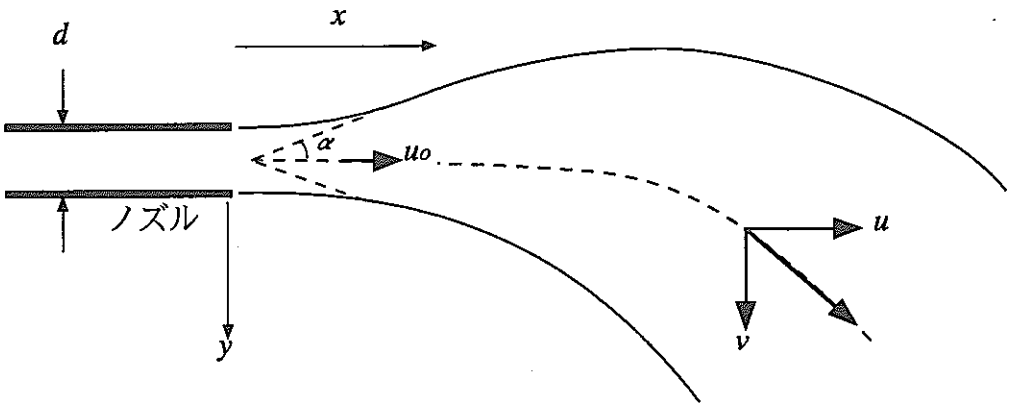


図3－1　流れの概要図

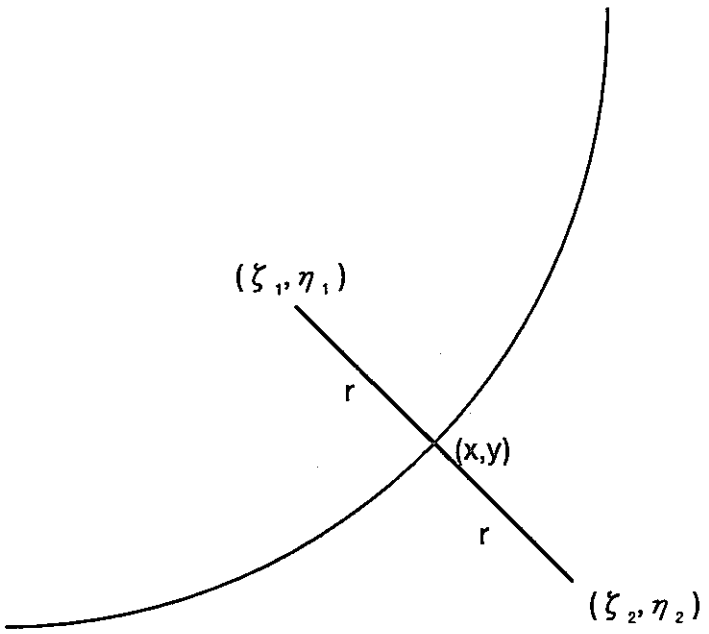


図3－2　濃度軸から法線方向へrの距離の座標

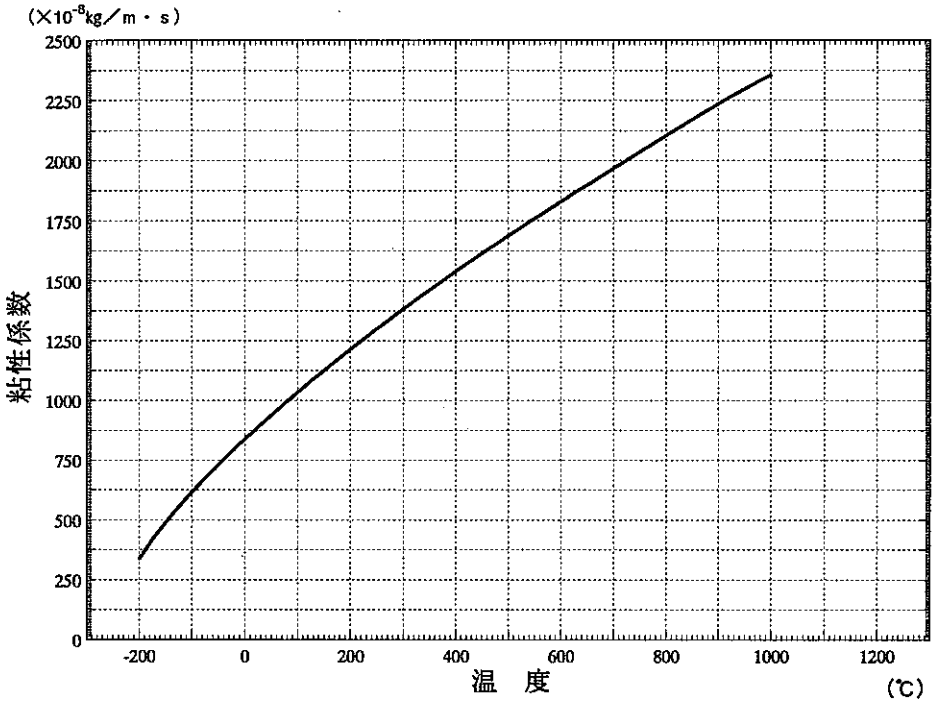


図３－３　水素の粘性係数

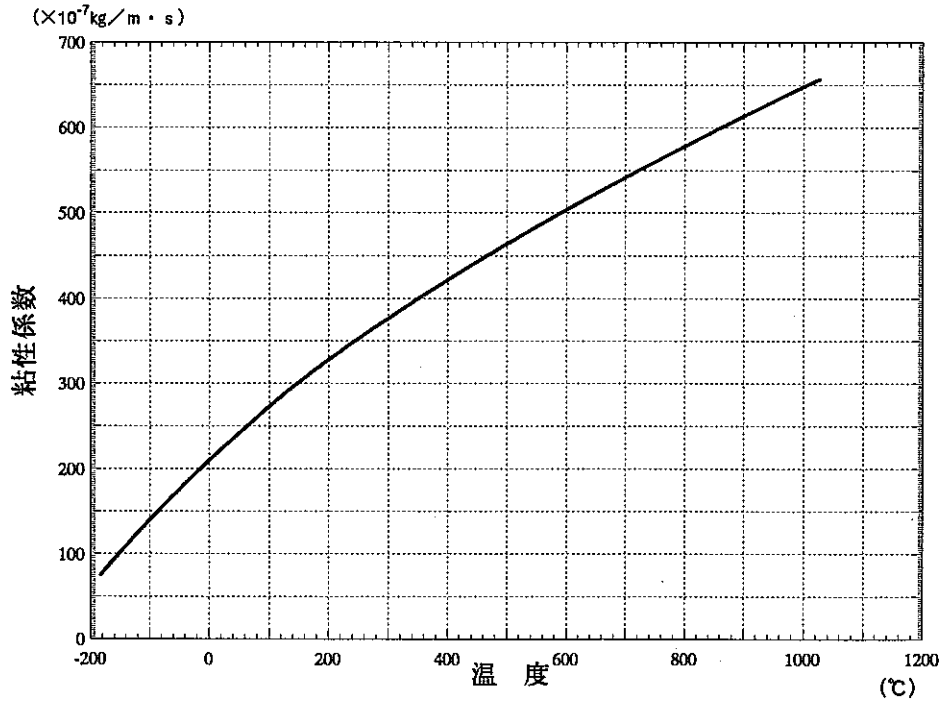


図３－４　アルゴンの粘性係数

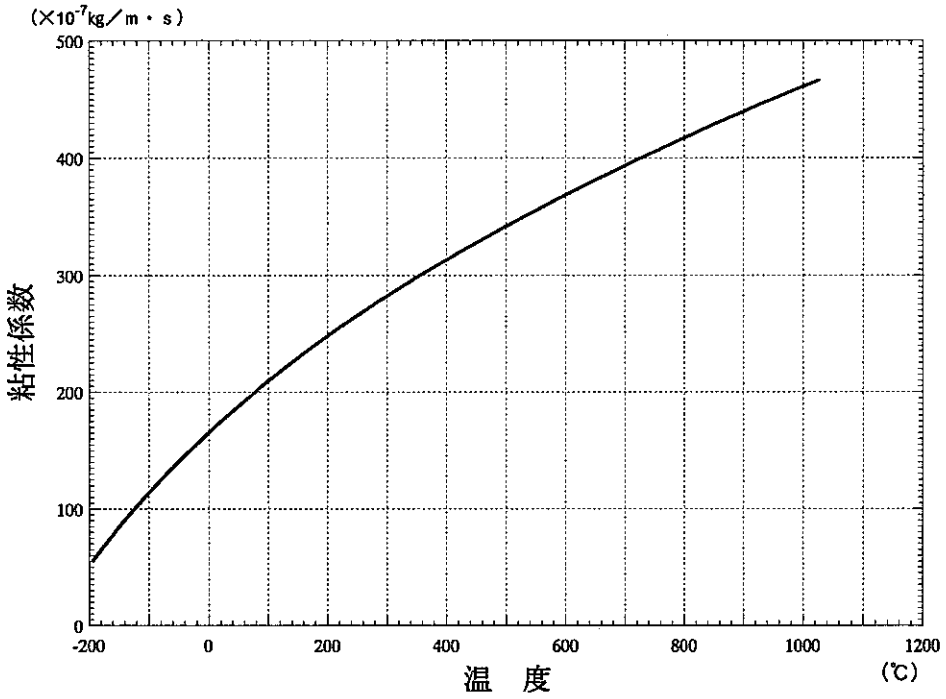


図３－５　窒素の粘性係数

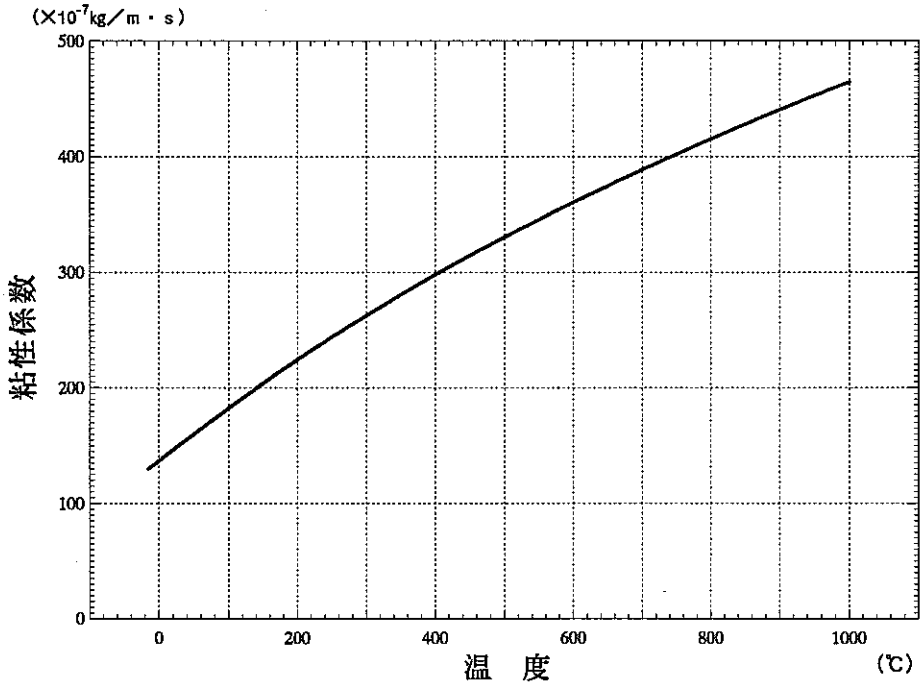


図３－６　二酸化炭素の粘性係数

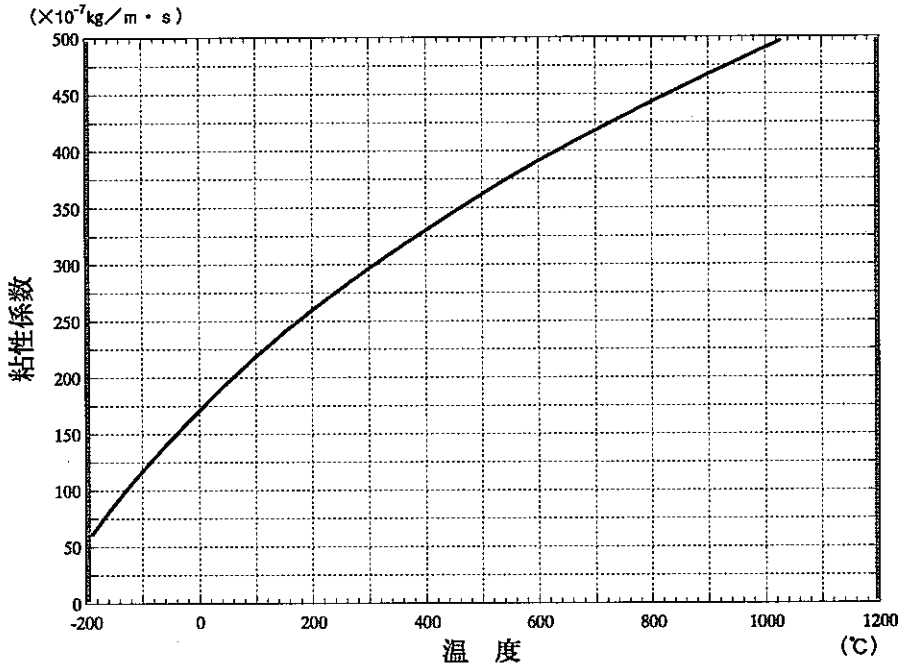
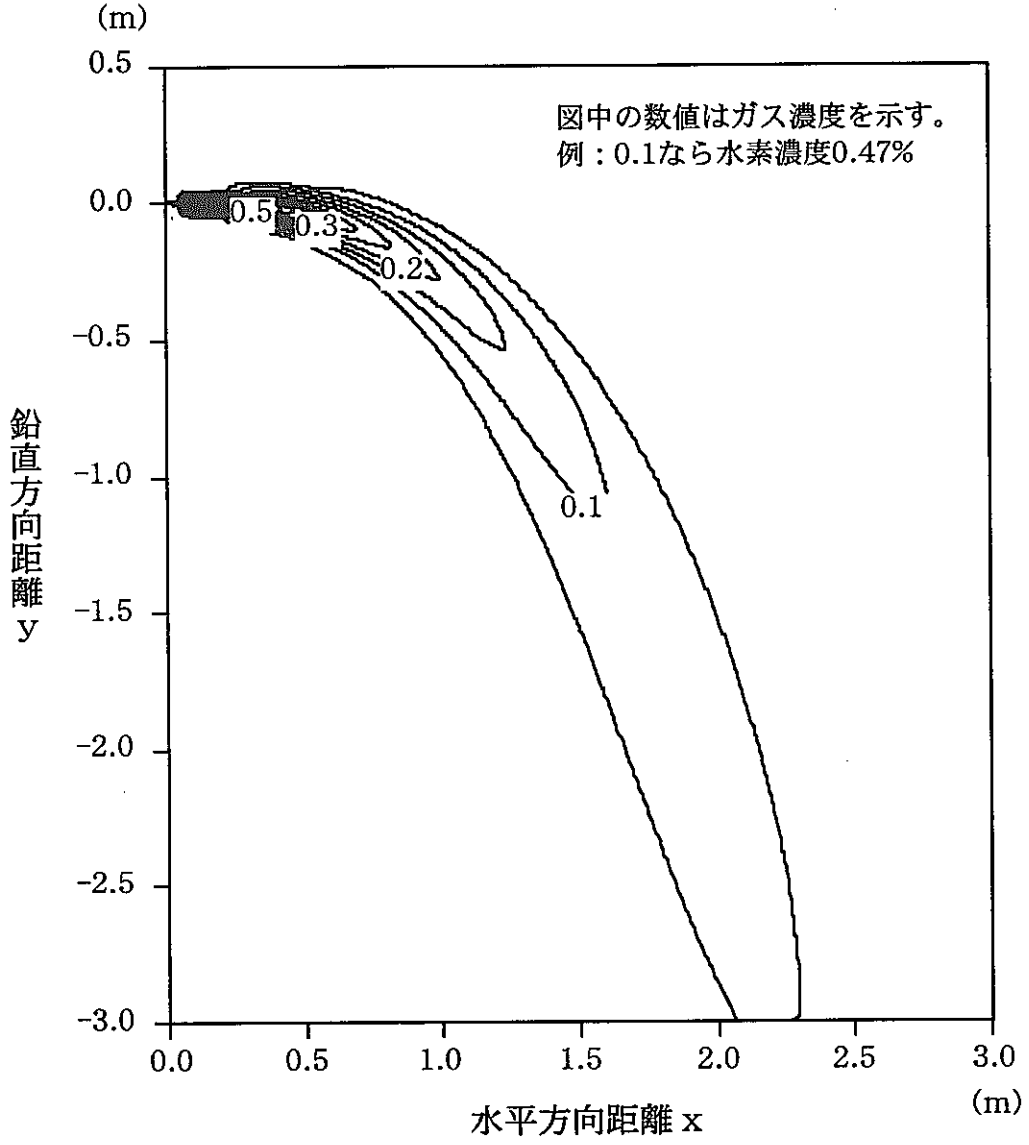

(×10⁻⁷kg／m・s)
粘性係数
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
-200
0
200
400
600
800
1000
1200
温　度
(℃)

図３－７　空気の粘性係数



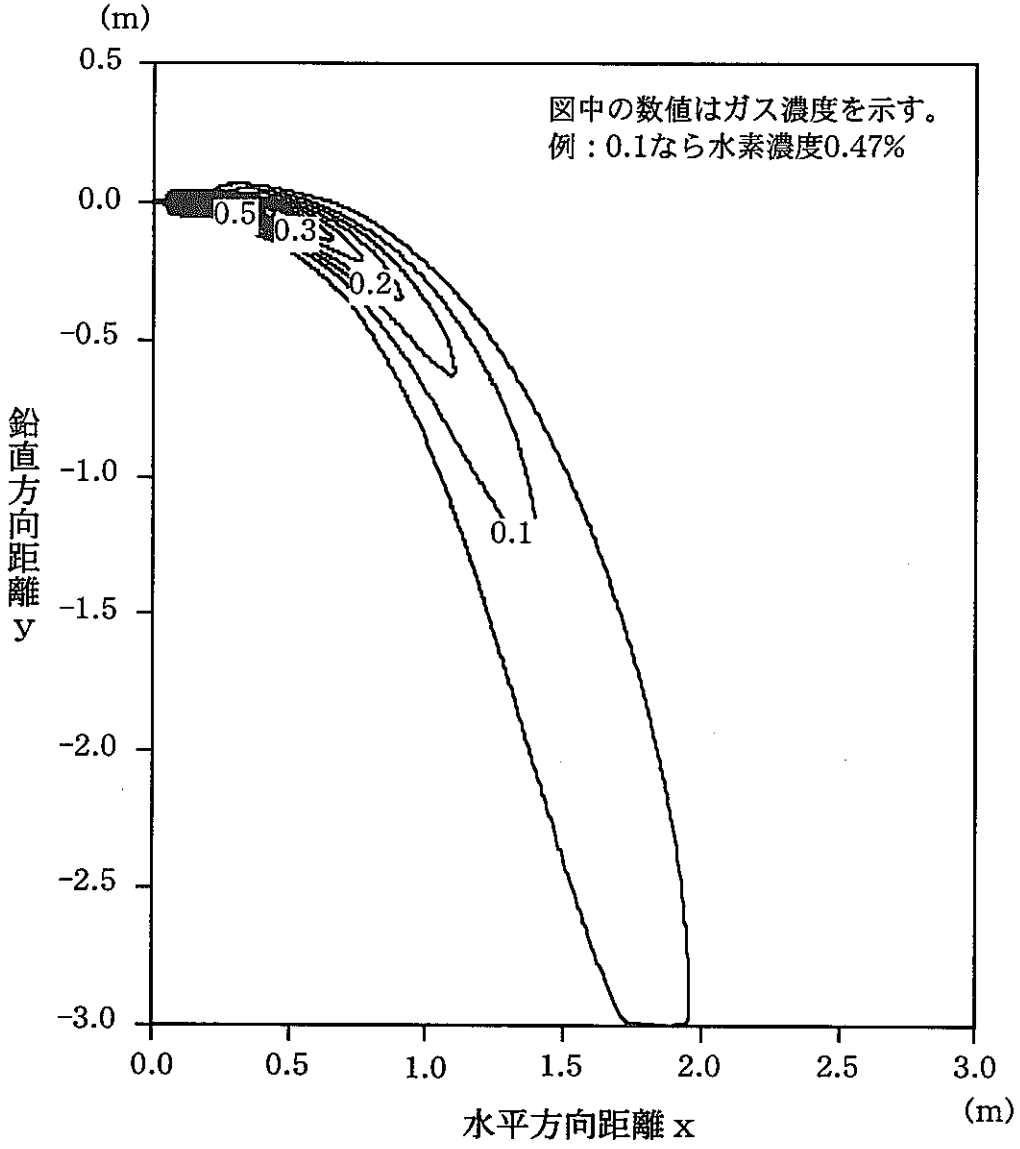
パラメータ設定値

項目	設定値
放出ガス	4.7%H_2-95.3%Ar
ガス放出管直径	40.6㎜
ガス放出管本数	1本
放出口総面積	$1.295\times10^{-3}m^2$
ガス流量	$9.72m^3$／h
ガス流速	2.54m／s
ガス温度	60℃

各水素濃度到達距離

水素濃度	水平方向距離（m）
4%	0.249
3%	0.331
2%	0.495
1%	0.943

図３－８　等濃度曲線図(1)



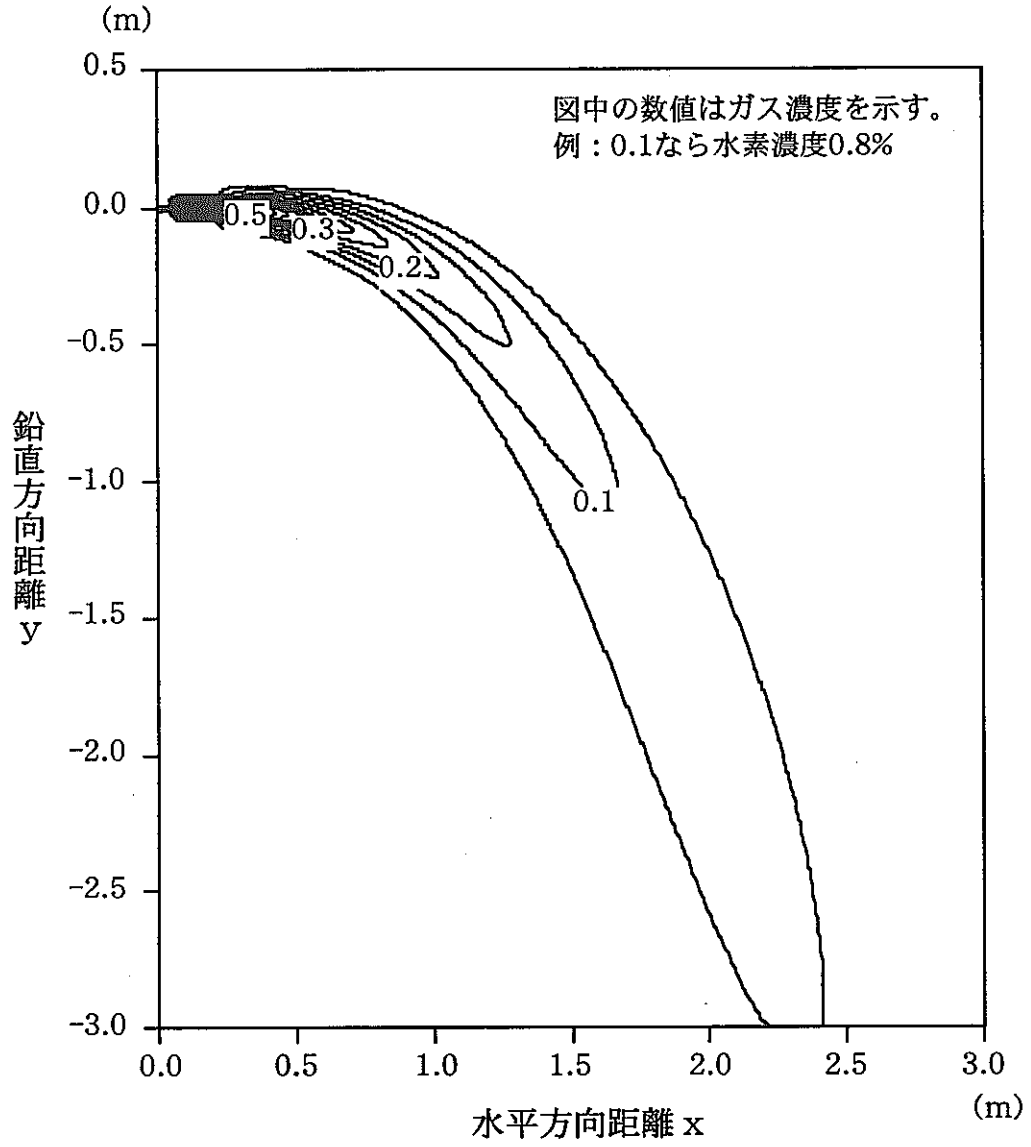
パラメータ設定値

項目	設定値
放出ガス	4.7%H_2-95.3%Ar
ガス放出管直径	40.6mm
ガス放出管本数	1本
放出口総面積	$1.295\times10^{-3}m^2$
ガス流量	$9.72m^3$／h
ガス流速	2.31m／s
ガス温度	30℃

各水素濃度到達距離

水素濃度	水平方向距離（m）
4%	0.237
3%	0.316
2%	0.470
1%	0.862

図３－９　等濃度曲線図(2)



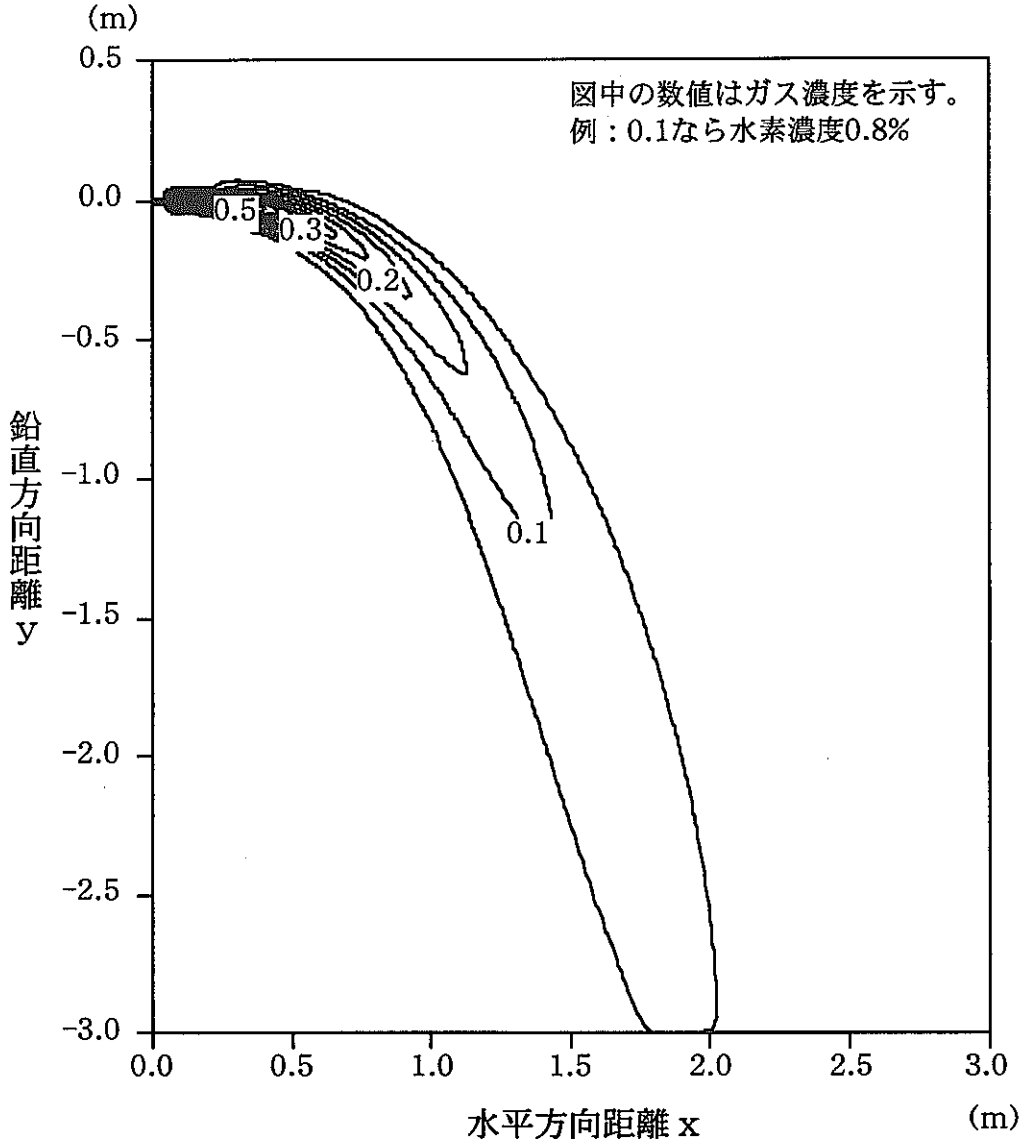
パラメータ設定値

項目	設定値
放出ガス	8%H_2-92%Ar
ガス放出管直径	40.6㎜
ガス放出管本数	1本
放出口総面積	$1.295\times10^{-3}m^2$
ガス流量	$9.72m^3/h$
ガス流速	2.54m／s
ガス温度	60℃

各水素濃度到達距離

水素濃度	水平方向距離（m）
7%	0.245
6%	0.286
5%	0.343
4%	0.429
3%	0.570
2%	0.838
1%	1.448

図３－１０　等濃度曲線図(3)



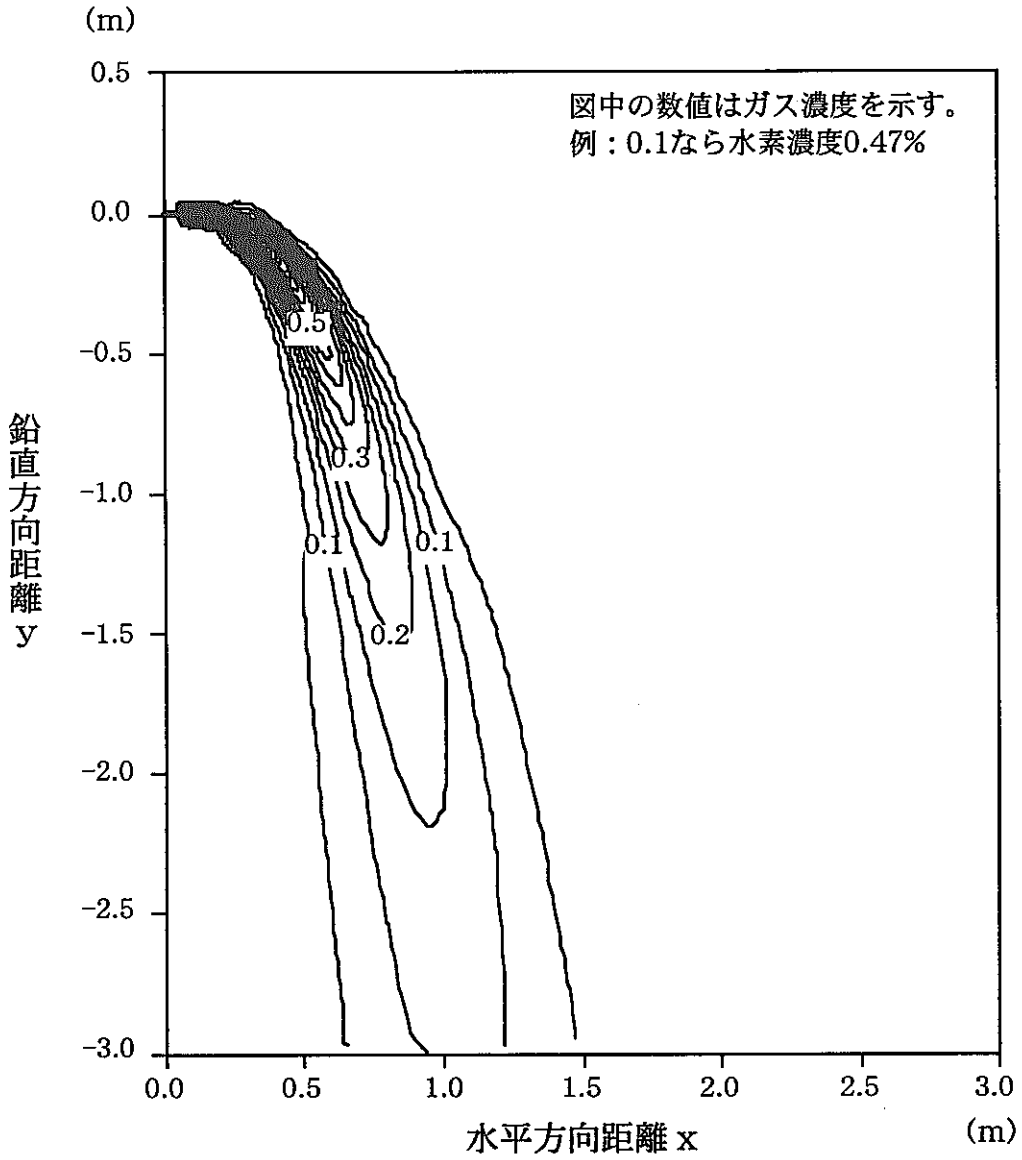
パラメータ設定値

項目	設定値
放出ガス	8%H_2-92%Ar
ガス放出管直径	40.6㎜
ガス放出管本数	1本
放出口総面積	$1.295\times10^{-3}m^2$
ガス流量	$9.72m^3$／h
ガス流速	2.31m／s
ガス温度	30℃

各水素濃度到達距離

水素濃度	水平方向距離（m）
7%	0.234
6%	0.273
5%	0.327
4%	0.408
3%	0.539
2%	0.775
1%	1.254

図３－１１　等濃度曲線図(4)



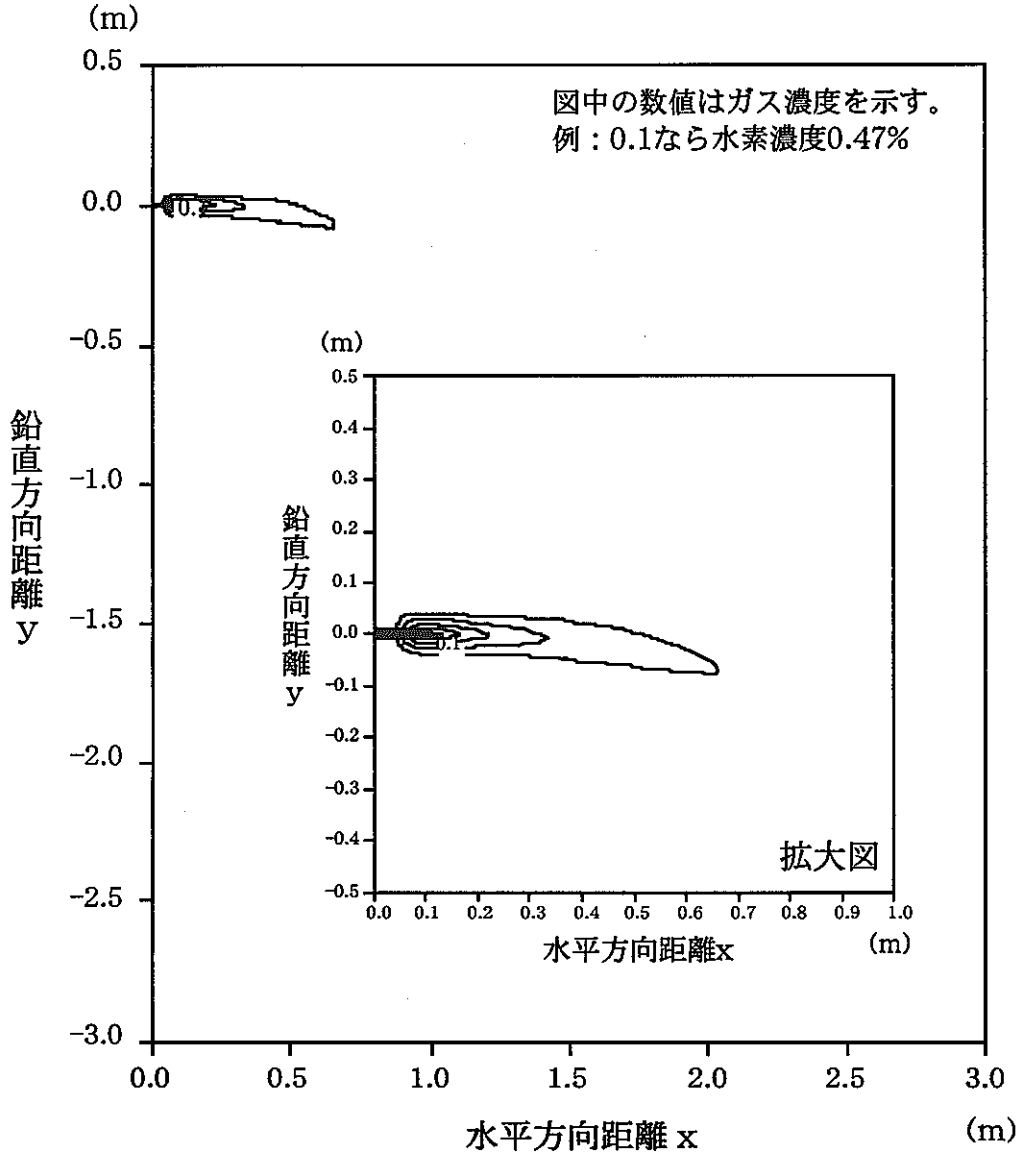
パラメータ設定値

項目	設定値
放出ガス	4.7%H_2-95.3%Ar
ガス放出管直径	81.2㎜
ガス放出管本数	1本
放出口総面積	$5.178\times10^{-3}m^2$
ガス流量	$9.72m^3$／h
ガス流速	0.64m／s
ガス温度	60℃

各水素濃度到達距離

水素濃度	水平方向距離（m）
4%	0.402
3%	0.486
2%	0.608
1%	0.830

図３－１２　等濃度曲線図(5)



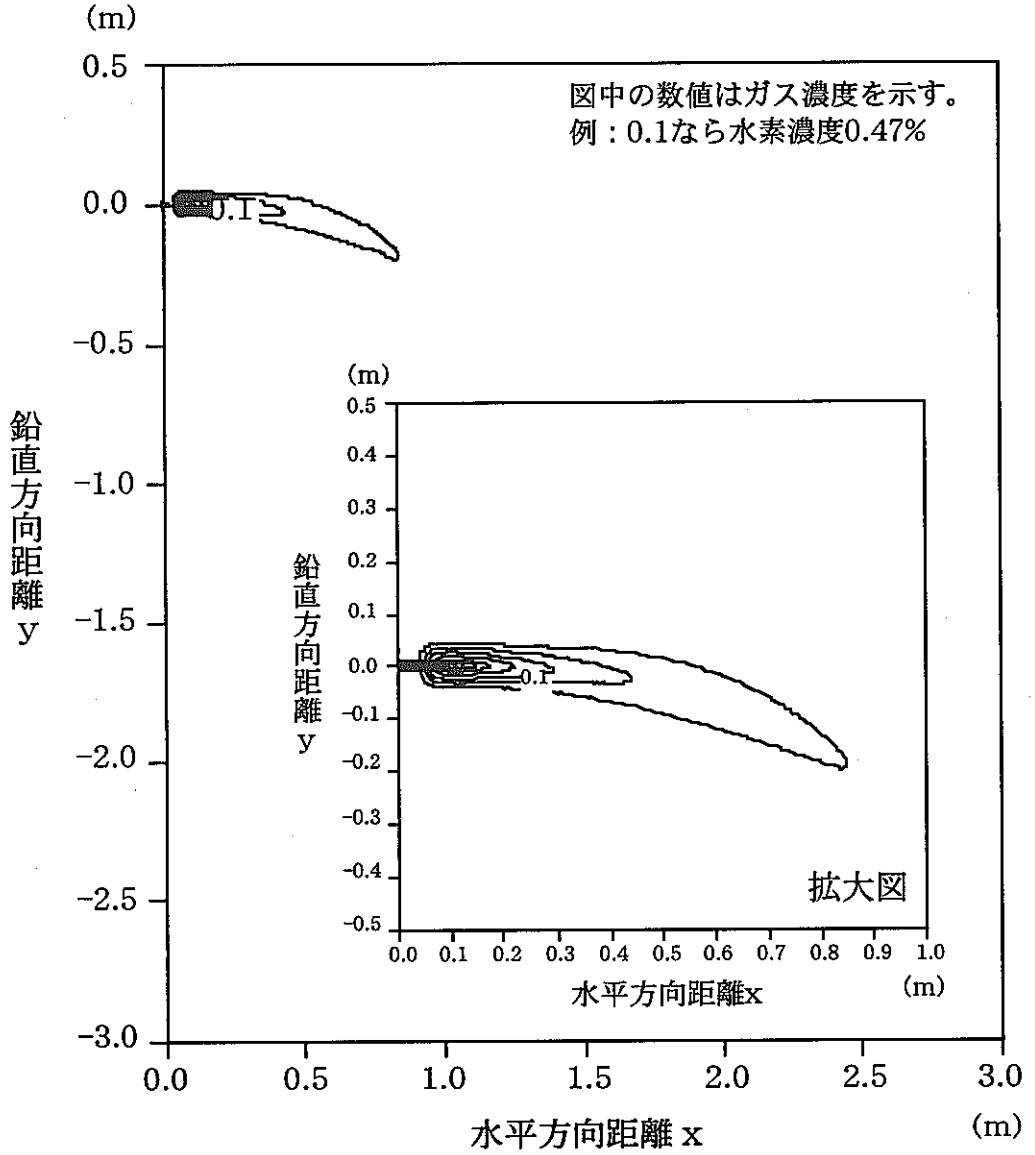
パラメータ設定値

項目	設定値
放出ガス	4.7%H_2-95.3%Ar
ガス放出管直径	7.1㎜
ガス放出管本数	12本
放出口総面積	4.751×10^{-4}㎡
ガス流量	9.72㎥／h
ガス流速	6.93m／s
ガス温度	60℃

各水素濃度到達距離

水素濃度	水平方向距離（m）
4%	0.039
3%	0.052
2%	0.079
1%	0.157

図３－１３　等濃度曲線図(6)



パラメータ設定値

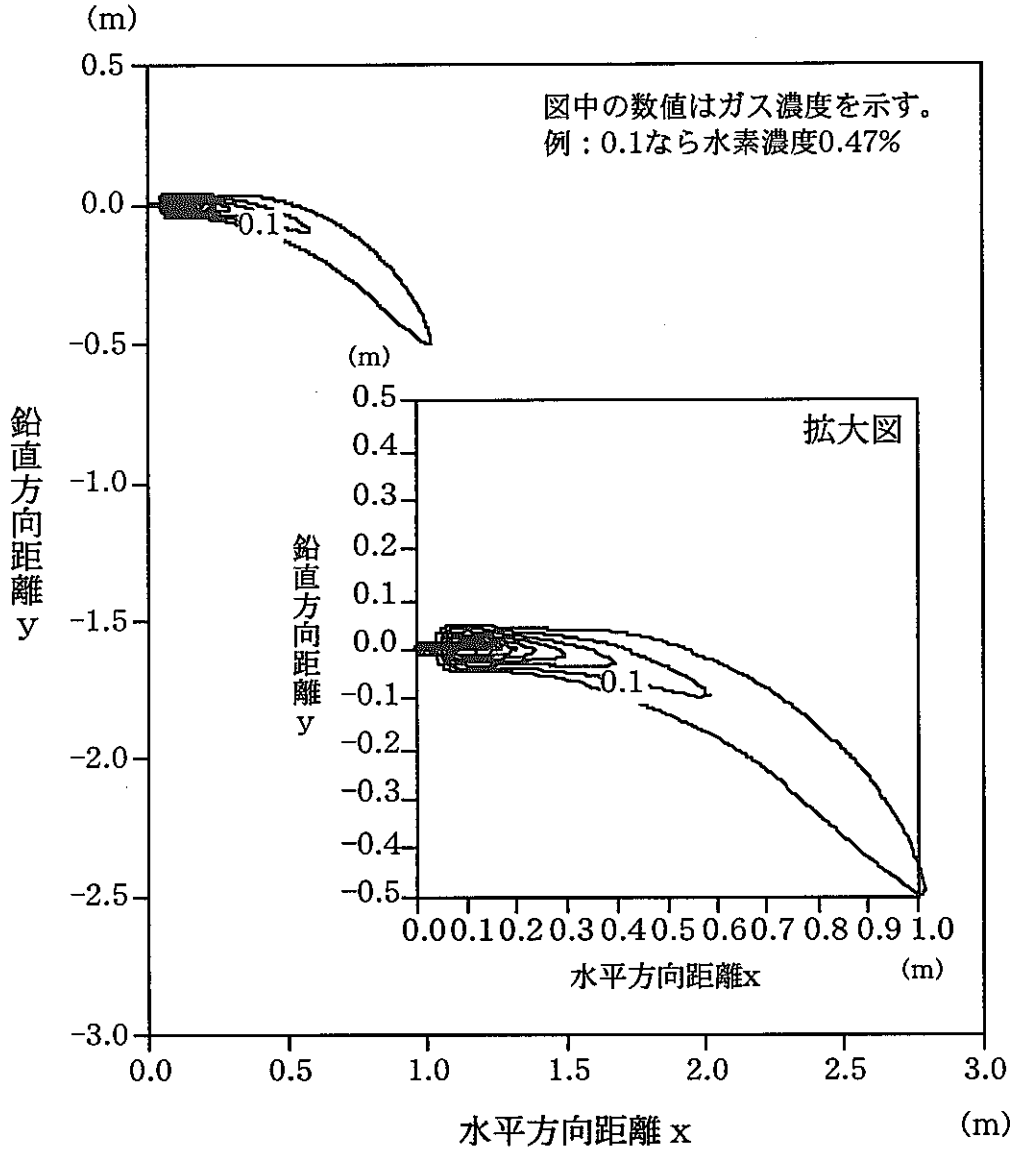
項目	設定値
放出ガス	4.7%H_2-95.3%Ar
ガス放出管直径	9.4㎜
ガス放出管本数	9本
放出口総面積	$6.246\times10^{-4}m^2$
ガス流量	$9.72m^3$／h
ガス流速	5.27m／s
ガス温度	60℃

各水素濃度到達距離

水素濃度	水平方向距離（m）
4%	0.052
3%	0.070
2%	0.104
1%	0.208

図３－１４　等濃度曲線図(7)

PNC TN8470 97-003



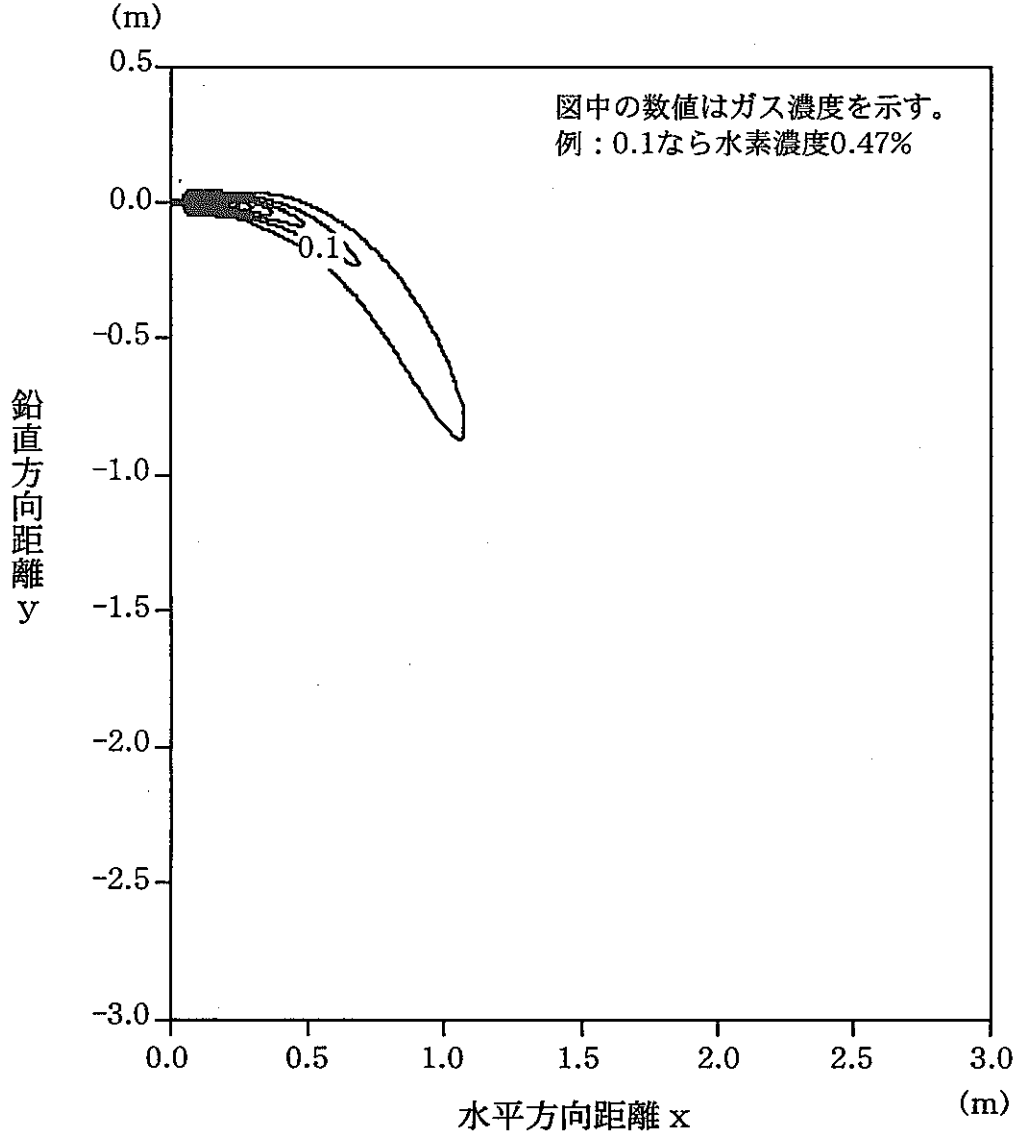
パラメータ設定値

項目	設定値
放出ガス	4.7%H_2-95.3%Ar
ガス放出管直径	12.7㎜
ガス放出管本数	7本
放出口総面積	$8.867\times10^{-4}m^2$
ガス流量	$9.72m^3/h$
ガス流速	3.71m／s
ガス温度	60℃

各水素濃度到達距離

水素濃度	水平方向距離（m）
4%	0.070
3%	0.093
2%	0.140
1%	0.279

図３－１５　等濃度曲線図(8)



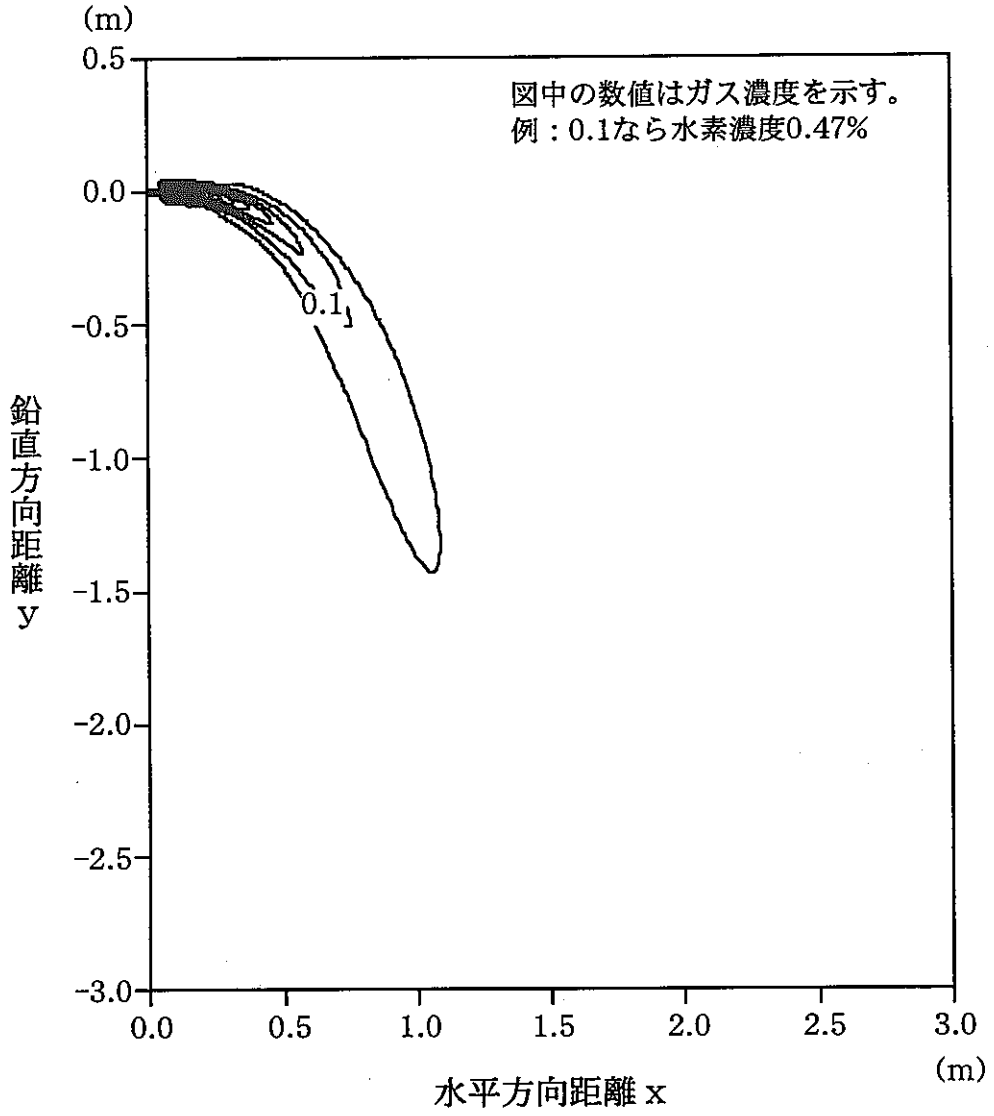
パラメータ設定値

項目	設定値
放出ガス	4.7%H_2-95.3%Ar
ガス放出管直径	16.1㎜
ガス放出管本数	6本
放出口総面積	$1.221\times10^{-3}m^2$
ガス流量	$9.72m^3$／h
ガス流速	2.70m／s
ガス温度	60℃

各水素濃度到達距離

水素濃度	水平方向距離（m）
4%	0.088
3%	0.117
2%	0.175
1%	0.348

図３－１６　等濃度曲線図(9)



パラメータ設定値

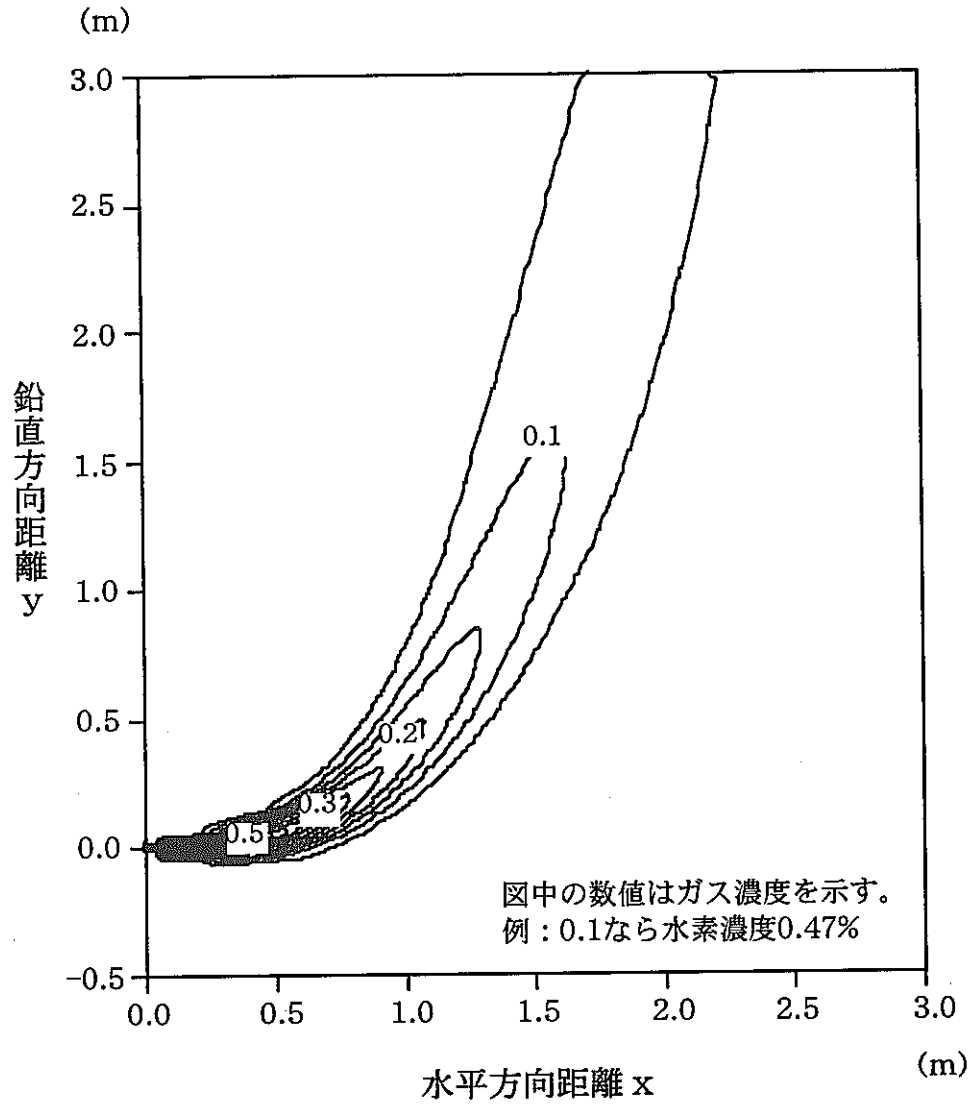
項目	設定値
放出ガス	4.7%H_2-95.3%Ar
ガス放出管直径	21.4㎜
ガス放出管本数	5本
放出口総面積	1.798×10^{-3}㎡
ガス流量	9.72㎥／h
ガス流速	1.83m／s
ガス温度	60℃

各水素濃度到達距離

水素濃度	水平方向距離（m）
4%	0.115
3%	0.153
2%	0.229
1%	0.439

図３－１７　等濃度曲線図(10)

PNC TN8470 97-003



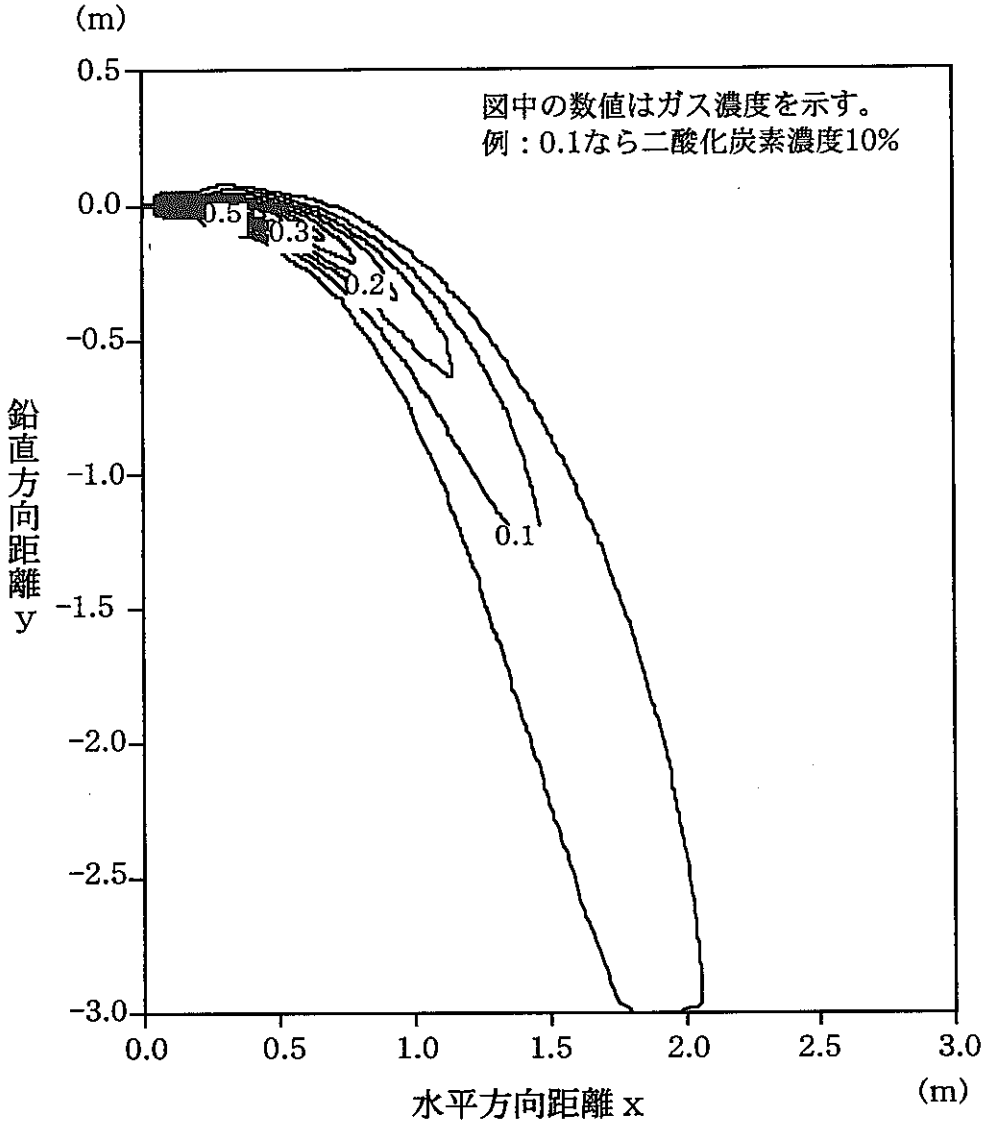
パラメータ設定値

項目	設定値
放出ガス	4.7%H_2-95.3%N_2
ガス放出管直径	4.06㎜
ガス放出管本数	1本
放出口総面積	$1.295\times10^{-3}m^2$
ガス流量	$9.72m^3$／h
ガス流速	2.54m／s
ガス温度	60℃

各水素濃度到達距離

水素濃度	水平方向距離（m）
4%	0.292
3%	0.389
2%	0.576
1%	1.033

図３－１８　等濃度曲線図(11)



パラメータ設定値

項目	設定値
放出ガス	CO_2
ガス放出管直径	4.06㎜
ガス放出管本数	1本
放出口総面積	$1.295\times10^{-3}m^2$
ガス流量	$9.72m^3/h$
ガス流速	2.54m／s
ガス温度	60℃

図３－１９　等濃度曲線図(12)

［参　考　文　献］

1)　柳生昭三：「ガス及び蒸気の爆発限界」安全工学協会
2)　上原陽一、佐藤公雄：安全工学 Vol.10-No.2、P86～91（1971）
3)　佐藤公雄：安全工学 Vol.16-No.5、P264～269（1977）
4)　柳生昭三：水素混合ガスの安全性に関する研究（Ⅰ）PNC PJ8655 96-001
5)　柳生昭三：水素混合ガスの安全性に関する研究（II）　PNC PJ8655 97-001
6)　青木義一：「炉からグローブボックス内に放出される排ガスによるグローブボックス内の水素濃度に関する考察」
（「プルトニウム燃料加工施設 内装設備設計報告書　昭和62年度」P122～131、PNC I8410 89-006）