高校化学 L01 第 129 講 炭素と炭素酸化物

この講でできるようになること

- ダイヤモンドと黒鉛の構造の違いから、硬さや電気伝導性の違いを説明できる。
- CO と CO_2の性質や酸化数を比較し、酸化還元反応における役割を判断できる。
- 石灰水による CO_2の確認について、白濁と過剰 CO_2による変化を条件とともに説明できる。

炭素の同素体

炭素Cは、同じ元素からなる異なる単体である同素体を持つ。

代表的な炭素の同素体として、ダイヤモンドと黒鉛がある。どちらも炭素原子だけからできているが、炭素原子の結合の仕方が異なるため、性質も大きく異なる。

ダイヤモンドの構造と性質

ダイヤモンドでは、1 個の炭素原子が 4 個の炭素原子と共有結合している。

炭素原子は正四面体方向に結合し、炭素原子同士が 3 次元的な網目構造を作る。

この強い共有結合の連続構造によって、ダイヤモンドは非常に硬い。 また、電気を運ぶ自由な電子がほとんどないため、通常は電気をほとんど通さない。

これは電子が存在しないという意味ではなく、電流を運ぶように移動できる電子が少ないという意味である。

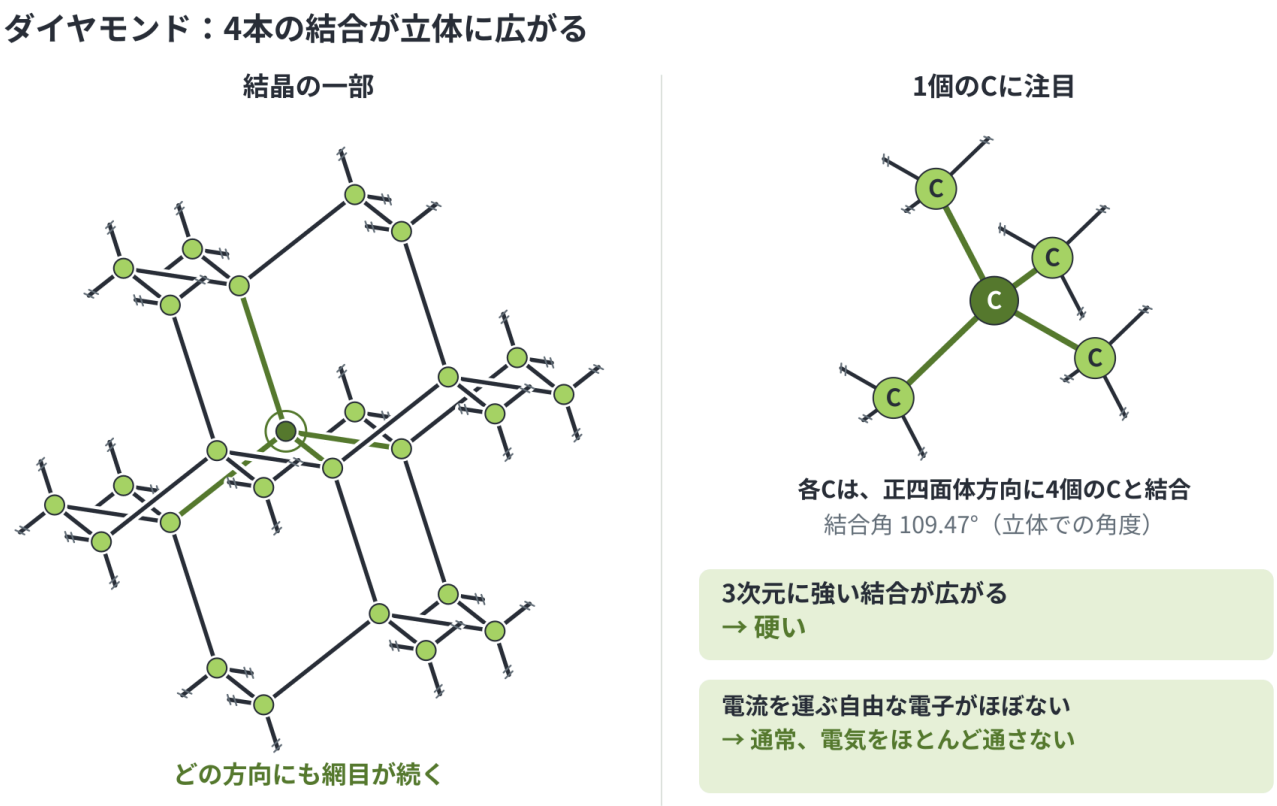


図 1　ダイヤモンドでは炭素原子が 4 方向に共有結合した 3 次元網目構造を作る。

©ミライコーチング

黒鉛の構造と性質

黒鉛では、炭素原子が同じ層内で 3 個の炭素原子と結合し、平面六角網状の層を作る。

層同士の相互作用は層内の共有結合より弱いため、層がずれやすい。 そのため、黒鉛は柔らかく、鉛筆の芯などに利用される。

また、黒鉛では層内を動くことのできる非局在電子が存在するため、主に層に沿って電気を通す。

ただし、層に垂直な方向に電気が絶対に流れないという意味ではない。

黒鉛は分子結晶ではなく、炭素原子が連続的につながった共有結合の構造を持つ。

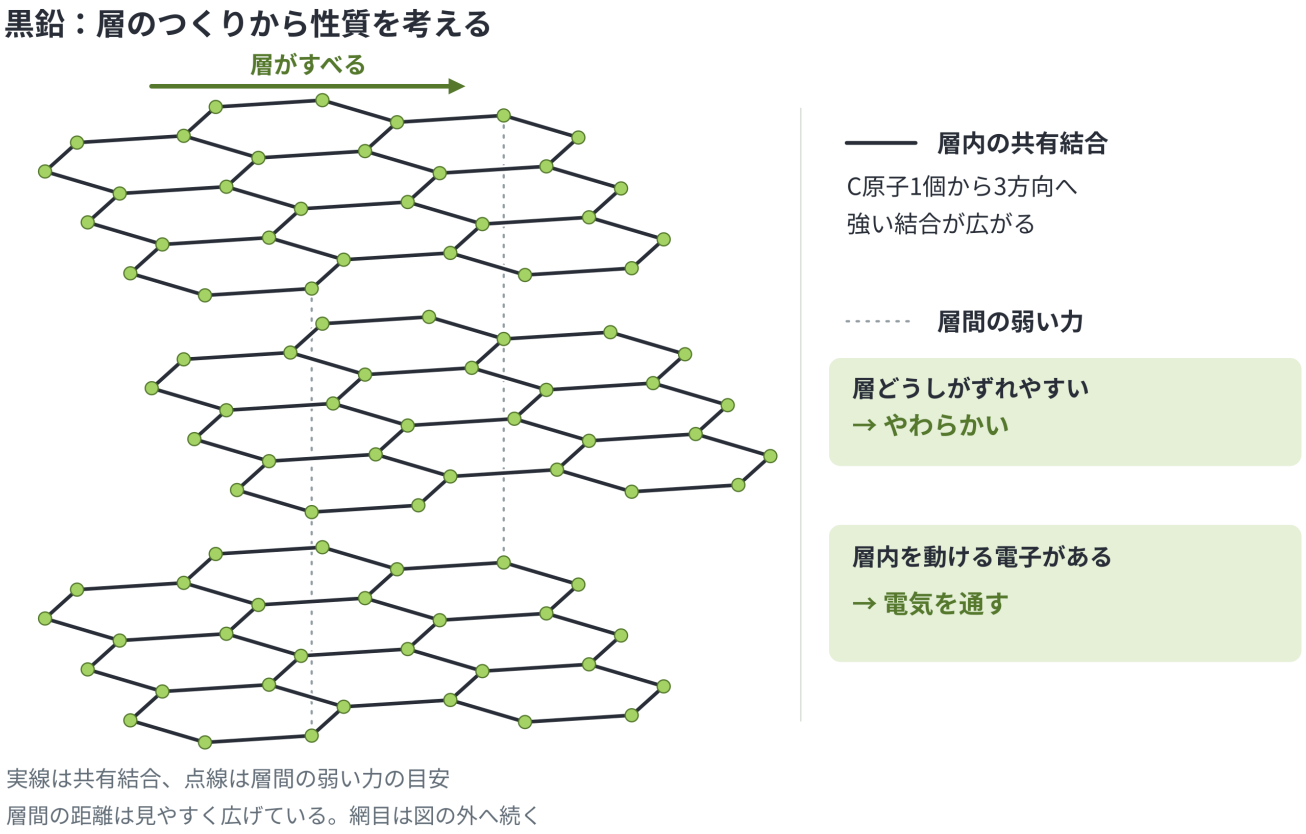


図 2　黒鉛は炭素原子の層状構造と層内電子によって性質が決まる。

同素体	構造	代表的な性質・用途
ダイヤモンド	3 次元網目構造	非常に硬い、研磨・切削材料
黒鉛	層状構造	電気を通す、電極や潤滑材に利用

炭素酸化物 CO と CO_2

一酸化炭素COと二酸化炭素CO_2は、どちらも炭素と酸素からなる化合物であり、同素体ではない。

どちらも常温では無色の気体であるが、性質は異なる。

COは無臭で水に溶けにくく、有毒である。においで安全性を判断することはできない。また、通常は水と反応して酸や塩基を生じず、中性酸化物に分類される。

CO_2は酸性酸化物であり、水と一部反応して炭酸を生じる。

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3$$

ただし、水中の炭素種がすべてH_2CO_3分子として存在するわけではない。

炭素の酸化数は、

物質	炭素の酸化数
CO	+2
CO_2	+4

である。

CO と CO_2の生成・反応

炭素の燃焼では、酸素供給量によって生成物が変化する。

完全燃焼では、 $C + O_2 \rightarrow CO_2$ となる。

一方、酸素が不足する不完全燃焼でCOを生じる反応は、 $2C + O_2 \rightarrow 2CO$ と表される。

CO は点火すると酸素と反応し、 $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ のように燃焼する。

また、加熱条件では、 $CuO + CO \rightarrow Cu + CO_2$ の反応が起こる。

この反応では、CO 中の炭素は、 $+2 \rightarrow +4$ となり酸化される。

一方、CuO 中の Cu は還元される。

したがって、CO は還元剤として働く。

CO_2は通常の条件では燃焼せず、ろうそくなどの燃焼も支えない。ただし、燃焼中のマグネシウム Mg はCO_2中でも次のように反応する。

$$2Mg + CO_2 \rightarrow 2MgO + C$$

この反応では Mg が酸化され、CO_2中の C が還元されるため、CO_2が酸化剤として働く。

石灰水による二酸化炭素の確認

石灰水は水酸化カルシウム$Ca(OH)_2$水溶液である。

二酸化炭素を通すと、 $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 \downarrow + H_2O$ となり、炭酸カルシウム$CaCO_3$の白色沈殿が生じる。

この白濁は CO_2の存在を判断する手がかりになる。

しかし、さらに過剰な CO_2を加えると、 $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2(aq)$ となり、炭酸水素カルシウムとして水中に溶ける。

このとき、溶液中ではCa^{2+}やHCO_3^-として存在するため、沈殿が消えて透明になる。

したがって、白濁が消えたからといって CO_2が存在しないとは限らない。

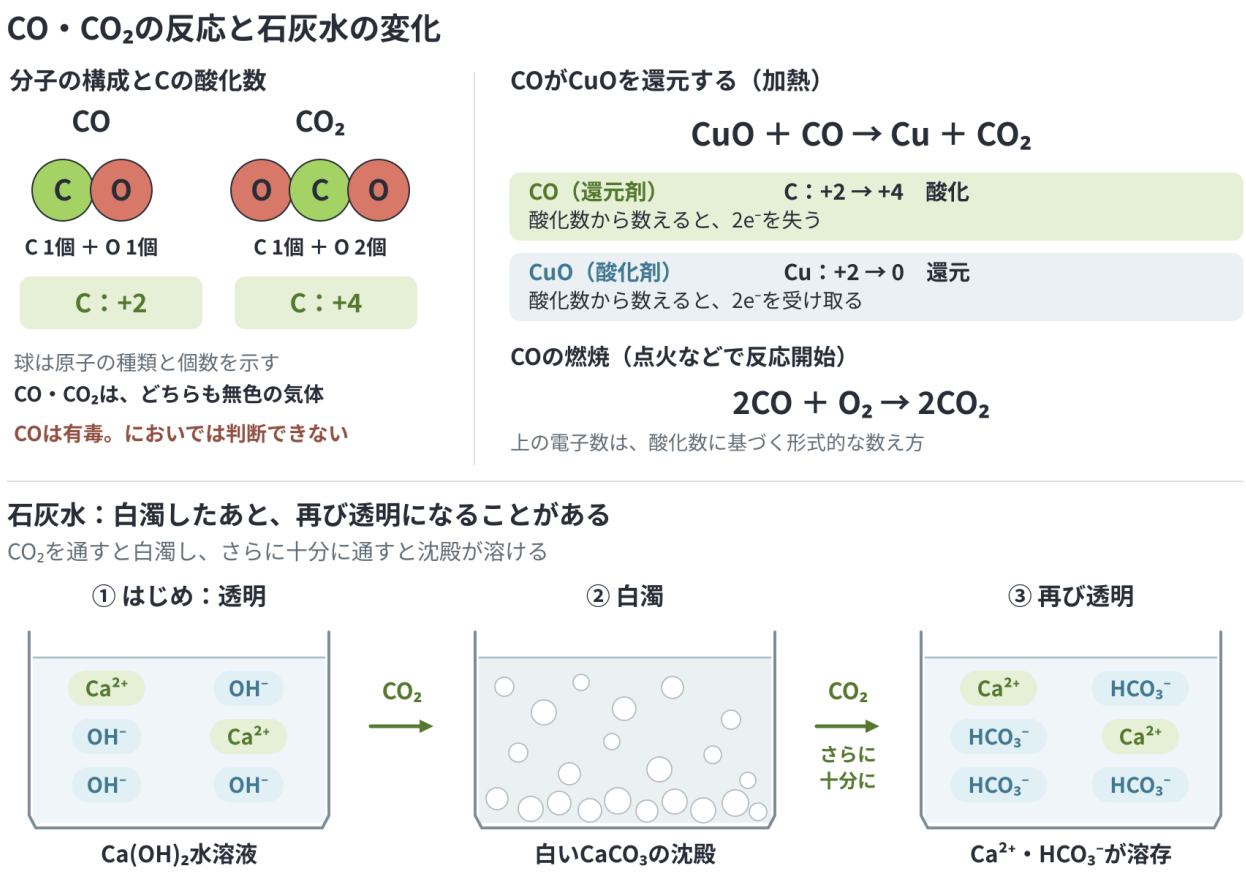


図 3　CO と CO_2の反応性、酸化数、石灰水での CO_2変化を比較する。

物質	特徴	代表的な反応・用途
CO	無色無臭、有毒、還元性を持つ	金属酸化物の還元
CO_2	無色気体、酸性酸化物	石灰水との反応

炭素の単体や酸化物では、同じ元素を含むかだけで判断せず、構造や酸化数、反応条件を確認することが重要である。

例題

例題 1

炭素の同素体であるダイヤモンドと黒鉛について考える。

1. ダイヤモンドと黒鉛の構造の違いを説明し、それぞれの硬さの違いを理由とともに説明せよ。
2. ダイヤモンドと黒鉛の電気伝導性の違いを、炭素原子の結合や電子の状態と関連づけて説明せよ。

解説

1.

ダイヤモンドでは、1 個の炭素原子が 4 個の炭素原子と共有結合し、3 次元的な網目構造を作っている。

強い共有結合が 3 次元に広がり、変形にはこれらの結合を変化させる必要があるため、非常に硬い。

一方、黒鉛では炭素原子が同じ層内で 3 個の炭素原子と結合し、層状構造を作っている。

層と層の間の相互作用は層内の共有結合より弱いため、層がずれやすく、黒鉛は柔らかい。

物質	構造	硬さの理由
ダイヤモンド	3 次元網目構造	強い共有結合が全体に広がる
黒鉛	層状構造	層間がずれやすい

2.

ダイヤモンドでは、炭素原子が 4 方向に共有結合しており、電流を運ぶように移動できる電子がほとんどない。

そのため、通常は電気をほとんど通さない。

一方、黒鉛では層内の炭素結合に関わる電子の一部が移動できるため、層に沿って電気を通す。

ただし、黒鉛の電気伝導性は方向によって異なり、層に垂直な方向に絶対に電気が流れないという意味ではない。

©ミライコーチング

例題 2

加熱した酸化銅CuOに一酸化炭素COを反応させる。反応は完全に進み、生成物は銅Cuと二酸化炭素CO_2である。

1. この反応の化学反応式を示し、炭素と銅の酸化数変化を説明せよ。
2. CuOを 1.00mol 完全に反応させる場合、必要なCOの物質量と生成するCO_2の物質量を求めよ。

解説

1.
反応式は、 $CuO + CO \to Cu + CO_2$ である。

酸化数を確認すると、

- CuO 中の Cu：$+2 \to 0$
- CO 中の C：$+2 \to +4$

となる。

Cu は電子を受け取って還元され、炭素は電子を失って酸化される。

物質	酸化数変化	役割
CuO 中の Cu	$+2 \to 0$	還元される
CO 中の C	$+2 \to +4$	酸化される

したがって、CO は還元剤として働き、CuO は酸化剤として働く。

2.
反応式の係数比は、 $CuO : CO : Cu : CO_2 = 1 : 1 : 1 : 1$ である。

そのため、CuOを 1.00mol 完全に反応させるには、 $n(CO) = 1.00\,\mathrm{mol}$ が必要である。

また、生成するCO_2は、 $n(CO_2) = 1.00\,\mathrm{mol}$ となる。

酸化数から数えると、CuO 1.00mol 中の Cu が受け取る電子の物質量は 2.00mol で、CO 1.00mol 中の C が失う電子の物質量 2.00mol と一致する。

©ミライコーチング

例題 3

石灰水に二酸化炭素CO_2を通す場合を考える。

条件 A：適量のCO_2を加える。

条件 B：さらに過剰なCO_2を加える。

1. 条件 A で白濁する理由を反応式とともに説明せよ。
2. 条件 B で透明になる理由を反応式と溶液中の粒子から説明せよ。

解説

1.
石灰水は水酸化カルシウム$Ca(OH)_2$水溶液である。

適量のCO_2を加えると、 $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 \downarrow + H_2O$ が起こる。

生成した炭酸カルシウム$CaCO_3$は水に溶けにくい白色沈殿であるため、溶液が白濁する。

この反応は、CO/CO_2候補の気体を考える場合に CO_2の確認方法として利用できるが、すべての未知気体を白濁だけで決定できるわけではない。

2.
さらに過剰なCO_2を加えると、生成した$CaCO_3$が反応する。

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2(aq)$$

炭酸水素カルシウムは水溶液中で存在し、Ca^{2+}やHCO_3^-として溶けている。

そのため沈殿が消え、溶液は再び透明になる。

したがって、白濁が消えたことは CO_2がなくなったことを意味せず、過剰な CO_2によって沈殿が溶解した結果である。

演習問題

演習 1

炭素の同素体について考える。

1. ダイヤモンドと黒鉛について、炭素原子の結合構造の違いを説明せよ。
2. ダイヤモンドと黒鉛で硬さや電気伝導性が異なる理由を、構造と電子の状態から説明せよ。

演習 2

炭素を含む物質について考える。

1. ダイヤモンド、黒鉛、CO、CO_2を単体と化合物に分類し、同素体にあたる組み合わせを答えよ。
2. COとCO_2の性質の違いを、炭素の酸化数と関連づけて説明せよ。

演習 3

一酸化炭素COの反応について考える。

1. 一酸化炭素の燃焼反応を化学反応式で示し、炭素の酸化数変化を説明せよ。
2. 加熱した酸化銅CuOにCOを十分反応させる。CuOを 2.00mol 完全に反応させたとき、必要なCOの物質量と生成するCO_2の物質量を求めよ。また、酸化還元の関係を説明せよ。

演習 4

石灰水に二酸化炭素CO_2を加える反応を考える。

石灰水中に$Ca(OH)_2$が 1.00mol 存在し、すべてが$CaCO_3$に変わるまでCO_2を加える。沈殿反応は完全に進み、過剰なCO_2による沈殿の再溶解は起こらないものとする。

1. 白色沈殿が生じる反応式を示し、生成する沈殿の物質名を答えよ。
2. $Ca(OH)_2$が 1.00mol すべて反応した場合、必要なCO_2の物質量と生成する沈殿の物質量を求めよ。

演習 5

演習 4 の条件で生じた沈殿に、さらに十分過剰なCO_2を加える。

1. 沈殿が消えて透明になる反応式を示し、溶液中に存在する主なイオンを答えよ。
2.「石灰水が透明になったのでCO_2は存在しない」という説明を訂正し、白濁が消える理由を説明せよ。

演習 6

未知気体候補がCOまたはCO_2のどちらかであるとする。

石灰水に通したところ、白濁が生じた。その後、さらに気体を十分加えると透明になった。

1. この観察結果から判断できる気体候補と、判断理由を説明せよ。

©ミライコーチング

演習問題の解答・解説

解答 1

1.
ダイヤモンドと黒鉛は、どちらも炭素だけからできた単体であり、同素体である。

ダイヤモンドでは、1 個の炭素原子が 4 個の炭素原子と共有結合し、3 次元的な網目構造を作る。

一方、黒鉛では、炭素原子が同じ層内で 3 個の炭素原子と結合し、層状構造を作る。

同じ元素からできていても、炭素原子の結合の仕方が異なるため、性質が変化する。

2.
ダイヤモンドは共有結合が 3 次元全体に広がっているため、非常に硬い。

また、電流を運ぶように移動できる電子がほとんどないため、通常は電気をほとんど通さない。

黒鉛では、層間の相互作用が層内の共有結合より弱く、層がずれやすいため柔らかい。また、層内に移動できる非局在電子が存在するため、主に層に沿って電気を通す。

物質	構造	性質
ダイヤモンド	3 次元網目構造	硬い、電気を通しにくい
黒鉛	層状構造	柔らかい、電気を通す

解答 2

1.
分類すると、

物質	分類
ダイヤモンド	単体
黒鉛	単体
CO	化合物
CO_2	化合物

である。

ダイヤモンドと黒鉛は、同じ炭素元素だけからなる異なる単体なので同素体である。

2.
CO中の炭素の酸化数は+2、CO_2中では+4である。

COでは炭素の酸化数が比較的小さく、さらに酸化されやすいため還元剤として働く場合がある。

一方、CO_2中の炭素の酸化数は+4であり、通常の燃焼ではCOのようにさらに酸化されない。ただし、燃焼中の Mg との反応では炭素の酸化数が+4から0へ下がり、CO_2は酸化剤として働く。また、酸塩基の性質による分類では、COは中性酸化物、CO_2は酸性酸化物である。

COとCO_2は同じ炭素酸化物でも、酸化数と性質が異なる。

©ミライコーチング

解答 3

1.
一酸化炭素の燃焼反応は、$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ である。

炭素の酸化数は、$+2 \rightarrow +4$ となり、炭素は酸化される。

したがって、COは燃焼によって酸化される物質である。

2.
反応式は、$CuO + CO \rightarrow Cu + CO_2$ である。

係数比は、$CuO : CO : CO_2 = 1 : 1 : 1$ である。

CuO 2.00mol を完全に反応させるには、$n(CO) = 2.00\,\mathrm{mol}$ が必要である。

また、生成するCO_2も、$n(CO_2) = 2.00\,\mathrm{mol}$ である。

酸化数変化は、

物質	変化	役割
Cu	$+2 \rightarrow 0$	還元される
C	$+2 \rightarrow +4$	酸化される

となる。

解答 4

1.
白色沈殿が生じる反応は、$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O$ である。

生成する沈殿は炭酸カルシウム$CaCO_3$である。

2.
反応式の係数比は、$Ca(OH)_2 : CO_2 : CaCO_3 = 1 : 1 : 1$ である。

$Ca(OH)_2$ 1.00mol がすべて反応する場合、$n(CO_2) = 1.00\,\mathrm{mol}$ が必要である。

また、生成する$CaCO_3$も、$n(CaCO_3) = 1.00\,\mathrm{mol}$ となる。

解答 5

1.
過剰なCO_2を加えると、$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2(aq)$ となる。

炭酸水素カルシウムは水溶液中で存在し、Ca^{2+}, HCO_3^- などのイオンとして存在する。

そのため、固体の$CaCO_3$沈殿がなくなり透明になる。

2.
「透明になったのでCO_2は存在しない」という説明は誤りである。

透明になる理由は、過剰なCO_2によって$CaCO_3$が水に溶ける形へ変化したためである。

状態	主な状態
初期の白濁	$CaCO_3$沈殿
過剰 CO_2後	Ca^{2+}、HCO_3^-として溶存

したがって、白濁の消失は CO_2がなくなったことを意味しない。

解答 6

1.
候補がCOとCO_2に限定される場合、この気体はCO_2である。

理由は、石灰水に加えると白濁し、さらに過剰に加えると透明になるためである。

CO_2では、 $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 \downarrow + H_2O$ によって白濁し、さらに、 $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2(aq)$ によって沈殿が溶解する。

一方、COではこの石灰水反応は起こらない。

ただし、未知気体全般について、この観察だけで必ず一意に決定できるわけではない。