問１. 以下の空欄（1）～（33）を埋めよ（1点×33）。

問2. 水素の特徴を２つ答えよ（4点×2）。

問3. 水素を輸送・貯蔵するための課題は何か（4点）。

問4. 水素の輸送・貯蔵方法を３つ答えよ（4点×3）。

問5. 高圧水素の利点と欠点を答えよ（4点×2）。

問6. 液体水素の利点と欠点を答えよ（4点×2）。

問7. メチルシクロヘキサンを用いた水素貯蔵と水素取り出し方法を説明せよ（4点×2）。

問8. 水素吸蔵合金の利点と欠点を答えよ（4点×2）。

問9. 水素化合物による貯蔵法では、どの方法が最も有望だと考えられるか。理由も述べよ（5点）。

問10. 水素社会の実現に向けて課題は何か、説明せよ（6点）。

1.水素社会に向けて

日本の発電の約80％は石炭や重油、天然ガスなどの（　1　）を燃料とする（　2　）です。 また、自動車の燃料も大部分が石油由来のガソリンや軽油です。化石燃料は燃焼するとその中に含まれる炭素が二酸化炭素となって排出されます。（　3　）は温室効果が高く、（　4　）の原因物質と考えられ、その排出量削減が世界的な緊急の課題になっています。水素は水素原子2個から成る気体で、エネルギー源として見た場合、 2つの主な特徴があります。 一つ目は、水素は様々な資源から作ることができます。化石燃料以外に、木材や食品廃棄物などのバイオマスから作ることができます。また、二酸化炭素を排出する化石燃料に代わるエネルギー源である、（　5　）などを使い、水の分解で作ることもできます。二つ目として、水素ガスは炭素を含まないので、燃やしても生成物は水のみで、二酸化炭素は排出しないことです。水素をエネルギー源として利用するために、水素の製造から輸送、貯蔵まで、いろいろな技術が使われます。この動画ではそのうちの輸送と貯蔵について紹介します。

2. 水素のエネルギー密度

（　6　）は、分子量が小さく軽いため、（　7　）が天然ガスやガソリンの 3 倍と大きい物質です。 一方、常温常圧の水素は気体で存在するため、（　8　）を比較すると天然ガスの 1/3、ガソリンの 1/2600 と小さくなります。 すなわち、同等のエネルギーを得るためには、常温常圧の状態では非常に大きな体積の水素が必要になります。ガソリンは、燃焼させてエネルギーとして用いる場合に二酸化炭素を放出するため、環境に大きな負荷をかけます。一方、水素は（　9　）などで酸素と反応させると、（　10　）のみを放出するため、環境に非常にやさしいエネルギーですが、体積エネルギー密度を大きくしてコンパクトに輸送・貯蔵する方法が課題となっています。

3. 水素の輸送・貯蔵方法

水素の輸送・貯蔵方法は大きく分けて、気体で貯蔵、液体で貯蔵、水素化合物で貯蔵の、3 つに分けられます。 気体で貯蔵する場合は、水素ガスを大気圧の 350 倍もしくは 700 倍に圧縮して （　11　）にします。質量エネルギー密度が大きいことから、現在では主に燃料電池自動車の水素タンクに用いられています。液体で貯蔵する場合は、水素ガスを、-253℃まで冷却して、（　12　）にします。 質量エネルギー密度に加えて、体積エネルギー密度も大きいので、タンカーなどでの大量輸送・貯蔵に向いています。（　13　）で貯蔵する場合には、水素ガスを他の化合物と反応させて、水素元素を含む物質に変換します。体積エネルギー密度が大きく貯蔵圧力が低いので、大量輸送・貯蔵や定置式の水素貯蔵に向いています。

4.気体で貯蔵

水素を単体の気体として貯蔵する場合について、詳しく説明します。水素の温度-圧力（　14　）を見ると、水素は、高圧にしても室温領域では 気体もしくは（　15　）にしかなりません。したがって、水素は室温、大気圧の700倍の圧力で、高圧水素の形で貯蔵できます。 このようなガス圧縮では、体積は常温常圧の水素ガスに比べて、1/440になります。 また、高圧の水素からは、室温で水素の取り出しが可能です。高圧水素の利点は、質量エネルギー密度が大きいことです。欠点としては、高圧まで圧縮するのにエネルギーが必要であることや、安全性の確保が上げられます。

5.液体で貯蔵

水素を単体の液体として貯蔵する場合について、詳しく説明します。水素の温度-圧力状態図において、低温領域では、水素は気体、液体、固体の 3相に変化します。 大気圧の水素の沸点は（　16　）です。 したがって、-253℃以下に冷却すれば、大気圧で液体水素を得ることができ、貯蔵できます。 液体水素の体積は、常温常圧の水素ガスの1/790になり、 高圧水素よりコンパクトにすることができます。また、水素の取り出しは室温で行うことができます。液体水素の利点は、このように、質量エネルギー密度に加えて、体積エネルギー密度も大きいことが挙げられます。欠点としては、冷却にエネルギーが必要なことです。

6.水素化合物で貯蔵、液体系

水素を化学反応で水素元素を含む化合物に変換して輸送・貯蔵し、逆反応で水素を取出して利用する方法について説明します。液体系では有機化合物が挙げられます。（　17　）を例に示します。（　18　）に水素を化合させてメチルシクロヘキサンに変換します。このシクロヘキサンを、ケミカルタンカーやタンクローリーなどで輸送し、貯蔵します。メチルシクロヘキサンの（　19　）により、水素を取り出して、使用します。水素を取り出した後のトルエンは、回収して水素生産地に送り、再使用することができます。基本の反応は、トルエンの水素添加とその逆反応の脱水素です。メチルシクロヘキサンは、大気圧、室温で液体状態で貯蔵でき、体積は、水素ガスの1/520まで小さくできます。 しかし、水素取り出しには300℃程度の温度が必要です。 もう一つの候補に、（　20　）が有ります。アンモニアは、水素を大気の主成分である窒素と反応させて、工業的に生産されています。（　21　）と言います。逆反応で、アンモニアから水素を取り出すことができ、分解後の（　22　）は大気に戻せます。またアンモニアは、直接燃焼して、エネルギー源として利用する方法も有ります。アンモニアは、室温で大気圧の10倍の圧力で液化し、液体状態で輸送・貯蔵できます。体積は、水素ガスの1/1200まで小さくできます。 しかし、水素取り出しには600℃程度の高温が必要です。

7. 水素化合物で貯蔵、固体系

固体系では（　23　）が検討されています。水素吸蔵合金は、水素を原子として金属の格子内に取り込み、水素化物の形で、固体として貯蔵できます。加熱すると、逆反応が起こり、水素ガスが放出されます。このような金属としては、（　24　）などが知られています。水素を吸蔵する金属は、水素を吸蔵すると膨張し、放出すると収縮するので、粉状になります。水素吸蔵合金は、室温で大気圧から 10 気圧程度で水素を貯蔵できます。 体積は水素ガスの 1/1100 まで小さくできます。 水素の取り出しは、20～80℃程度と、比較的低温でできます。

8. 水素化合物による貯蔵法の比較

以上の 3 種の（　25　）の体積エネルギー密度を比較すると、 （　26　）は常温常圧の水素ガスの 500 倍です。 （　27　）および（　28　）は、更に体積エネルギー密度が大きく、常温常圧の水素ガスの 1000 倍以上です。 一方、質量エネルギー密度では、水素吸蔵合金は金属自体が重い元素で構成されるため、有機化合物に比べ、1/6 と小さくなります。 水素吸蔵合金の課題は、質量エネルギー密度の大きい材料の開発があげられます。水素化合物の利点は、このように体積エネルギー密度が大きく、室温で貯蔵できることに加えて、貯蔵圧力が低いことにあります。一方、欠点としては、有機化合物やアンモニアでは、水素からの製造や取り出しに高温が必要となります。今後の研究課題は、製造や水素取り出しのエネルギー効率を高める方法の開発が挙げられます。

9.将来の展望

将来的には、（　29　）を水素に変換し、大量に輸送・貯蔵し、利用する、（　30　）を排出しないエネルギーシステムの構築が期待されています。 たとえば、太陽光や風力などの再生可能エネルギーから、（　31　）を使って水素を製造し、水素を液体水素や、有機化合物、アンモニアの形にして輸送し、貯蔵します。水素を、エネルギー利用する場合には、水素ガスタービンや、高温型燃料電池を用いることで、大量発電ができます。家庭などでは、（　32　）で、発電することができます。また、高圧水素を燃料タンクとして、（　33　）の利用も進められていくでしょう。

【解答】

問1. 化石燃料、火力発電、二酸化炭素、地球温暖化、再生可能エネルギー、水素、質量エネルギー密度、体積エネルギー密度、燃料電池、水、高圧水素、液体水素、水素化合物、状態図、超臨界状態、-253℃、メチルシクロヘキサン、トルエン、脱水素反応、アンモニア、ハーバーボッシュ法、窒素、水素吸蔵合金、ランタンニッケル合金、水素化合物、有機化合物、アンモニア、水素吸蔵合金、再生可能エネルギー、CO2、水電解、定置型燃料電池、燃料電池自動車

問2.

問3.

問4.

問5.

問6.

問7.

問8.

問9.

問10.