

第18回原子力機構報告会でのご質問及び回答

質 問	回 答																				
<p>水素の安全性はどのように担保されるのでしょうか。 水素はどうしても爆発して危険というイメージがありますが、実際にはどうなのでしょう。</p>	<p>水素は天然ガス・都市ガスなどより漏れやすく、爆発が容易ですが、対策技術がここまでにある程度確立されています。水素を供給する水素ステーションは爆発災害リスクを減らすためにガソリンステーションより広い場所を確保しています。危険性を理解して使えば社会利用は可能と考えます。</p>																				
<p>ホワイト水素と言うものがあり、これは天然に存在するものと聞きました。 地球上どれくらいの埋蔵量があるのでしょうか。また日本での埋蔵量はどれくらいありますか。</p>	<p>ホワイト水素は地下において自然に生成された水素とされ、近年その可能性が検討されていると聞きます。日本での採掘情報は持っていません。水素は非常に拡散がしやすく、燃焼・爆発が高速に進行しますので、自然界から安定かつ安全に回収できるかは今後の検討課題と推察します。</p>																				
<p>水素を社会に実装する場合、どの程度必要で、それを原子力で賄うと、どれくらい（何MW?GW?）必要でしょうか。</p>	<p>例えば製鉄、化学プラントは一か所で数GW程度のエネルギーを必要とします。これを水素で賄うとすると、その水素の製造には1GW級の原子力発電所が数基必要になります。なお1GW発電はメガソーラー発電所1000箇所に相当します。</p>																				
<p>高温ガス炉の運転経費は既存の軽水炉と比較してどの程度なのでしょう。 それは発電と水素製造といった複数の用途を組み合わせても、あまり変わらないものなのですか。</p>	<p>発電用の高温ガス炉に対しては、運転経費を2.1円/kWhと試算しています※1。水素製造プラントは、原子炉から独立した非原子力施設として扱われ、運転経費を2.0円/Nm³と試算しています※2。高温ガス炉の運転経費としては複数の用途を組み合わせても変わりません。 ※1 深谷ほか、商用高温ガス炉発電原価の再評価、日本原子力学会和文論文誌、21(2)、116-126 (2022) ※2 岩月ほか、高温ガス炉ISプロセス水素製造システムの経済性評価、JAEA-Review 2014-037 (2014)</p>																				
<p>高温ガス炉は、最終的にどのくらいの高温まで取り出せるのですか。 例えば製鉄に必要な2千°Cとか3千°Cといった温度も、いずれは取り出せるようになるのですか。</p>	<p>1970年代頃に原子力製鉄を指向した「高温還元ガス利用による直接製鉄の技術開発」が行われ、原子炉出口温度1000°Cまで使用可能な超耐熱合金の開発も行われましたが、長期的な燃料健全性維持等の観点から、原子炉から取り出せる最高温度は950°Cであり、これ以上の高温熱の取り出しは現状では困難です。</p>																				
<p>高温ガス炉の実証炉は、どの程度の出力規模で、どの程度の前算を見込んでいるのですか。 商業炉だと、どうなりますか。</p>	<p>国内高温ガス炉実証炉の基本設計を実施するとともに将来的には製造・建設を担う中核企業に選定された三菱重工業株式会社は、実証炉の原子炉出力を150MW～250MWth程度と公表しています※。実証炉の建設コストは、本年度開始された基本設計が完了する段階で試算されると認識しています。商業炉の出力規模は、ユーザーが要求する水素製造量や実証炉の経済性を踏まえて、商業炉の事業者が決定するため、現時点では未定です。なお、中国は実証炉HTR-PM 250MWth×2を複数設置し、モジュール化させて商業炉とする計画（250MWth×2×3）であり、米国Xエナジー社は200MWthを複数配置し、モジュール化させて商業炉とする計画（200MWth×4）です。 ※確井ほか、三菱重工業における高温ガス炉開発の取り組み、日本保全学会 第19回学術講演会 C-1-1-4 (2023).</p>																				
<p>OHP13ページの4つの水素製造法の長所と短所を簡単に教えて下さい。 またそれぞれのコストをお願いします。</p>	<table border="1" data-bbox="709 1173 2686 1352"> <thead> <tr> <th>水素製造法</th> <th>メタン水蒸気改質法</th> <th>高温水蒸気電解法</th> <th>メタン直接分解法</th> <th>熱化学法 IS プロセス</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>長所</td> <td>すでに確立された技術であり、大量水素製造に適する</td> <td>水蒸気を電気分解する方法であり、水の電気分解に比べて30%程度少ない電力で水素を製造可能</td> <td>化石資源を使用するが、CO₂を発生しない水素製造法</td> <td>電気を介さず熱だけで水を分解できる方法であり、高効率に水素を製造可能</td> </tr> <tr> <td>短所</td> <td>製造時にCO₂排出を伴うため、CCUS（二酸化炭素の回収・有効利用・貯留）などとの組み合わせが必要</td> <td>700 °C以上の高温環境が必要であり、水蒸気の生成、昇温に高温ガス炉の熱が必要</td> <td>水素と共に固体炭素が得られるので、固体炭素の活用先を含めた検討が必要</td> <td>高温硫酸などの腐食性流体に耐食性のある材料・機器が必要</td> </tr> <tr> <td>コスト</td> <td>(試算データなし)</td> <td>高温ガス炉と組み合わせの場合、2.08 USD/kg (28円/Nm³@150円/USD) と試算 (※1)</td> <td>(試算データなし)</td> <td>高温ガス炉と組み合わせの場合、25.4円/Nm³と試算 (※2)</td> </tr> </tbody> </table> <p>※1 OECD/NEA, The Role of Nuclear Power in the Hydrogen Economy:Cost and Competitiveness, NEA No.7630 (2022). ※2 岩月ほか、高温ガス炉ISプロセス水素製造システムの経済性評価、JAEA-Review 2014-037 (2014)</p>	水素製造法	メタン水蒸気改質法	高温水蒸気電解法	メタン直接分解法	熱化学法 IS プロセス	長所	すでに確立された技術であり、大量水素製造に適する	水蒸気を電気分解する方法であり、水の電気分解に比べて30%程度少ない電力で水素を製造可能	化石資源を使用するが、CO ₂ を発生しない水素製造法	電気を介さず熱だけで水を分解できる方法であり、高効率に水素を製造可能	短所	製造時にCO ₂ 排出を伴うため、CCUS（二酸化炭素の回収・有効利用・貯留）などとの組み合わせが必要	700 °C以上の高温環境が必要であり、水蒸気の生成、昇温に高温ガス炉の熱が必要	水素と共に固体炭素が得られるので、固体炭素の活用先を含めた検討が必要	高温硫酸などの腐食性流体に耐食性のある材料・機器が必要	コスト	(試算データなし)	高温ガス炉と組み合わせの場合、2.08 USD/kg (28円/Nm ³ @150円/USD) と試算 (※1)	(試算データなし)	高温ガス炉と組み合わせの場合、25.4円/Nm ³ と試算 (※2)
水素製造法	メタン水蒸気改質法	高温水蒸気電解法	メタン直接分解法	熱化学法 IS プロセス																	
長所	すでに確立された技術であり、大量水素製造に適する	水蒸気を電気分解する方法であり、水の電気分解に比べて30%程度少ない電力で水素を製造可能	化石資源を使用するが、CO ₂ を発生しない水素製造法	電気を介さず熱だけで水を分解できる方法であり、高効率に水素を製造可能																	
短所	製造時にCO ₂ 排出を伴うため、CCUS（二酸化炭素の回収・有効利用・貯留）などとの組み合わせが必要	700 °C以上の高温環境が必要であり、水蒸気の生成、昇温に高温ガス炉の熱が必要	水素と共に固体炭素が得られるので、固体炭素の活用先を含めた検討が必要	高温硫酸などの腐食性流体に耐食性のある材料・機器が必要																	
コスト	(試算データなし)	高温ガス炉と組み合わせの場合、2.08 USD/kg (28円/Nm ³ @150円/USD) と試算 (※1)	(試算データなし)	高温ガス炉と組み合わせの場合、25.4円/Nm ³ と試算 (※2)																	

質 問	回 答
OHP23ページで軽水炉の発電は蒸気タービンでしょうが、高温ガス炉もやはり蒸気タービンですか。	高温ガス炉は、蒸気タービンに加えて、原子炉冷却材であるヘリウムを利用したガスタービンで発電を行うことも可能であり、水を使わない観点等からガスタービンに優位性があります。
諸外国はIS法を採用していないようですが、日本がIS法にこだわるのは何故ですか。見通しは、どうなっていますか。	国内実証炉に接続する水素製造技術は選定されていません。今後、メタン水蒸気改質法、高温水蒸気電解法、メタン直接分解法、熱化学法ISプロセスを対象にフィージビリティスタディーを進め、高温ガス炉に実用的に接続可能なカーボンフリー水素製造技術を見極める予定です。
自冷容量を有するHTTRが、今後、分散化電源の普及に寄与する可能性について、貴機構と電力事業者との交流や研究の実績をお知らせください。	HTTRをご視察いただいた際などに、適宜、意見交換を行っています。
HTTRの特許申請の件数をお知らせください。また、その他の知的財産権の権利化の実績をお知らせください。	旧原研時代を含め、JAEAは高温ガス炉に係る特許を90件程度出願しています。意匠権、商標権等の出願実績はありません。
HTTRの国際規格化の動向についてお知らせください。	本年7月に、JAEAと英国国立原子力研究所（NNL）のチームが、英国の高温ガス炉実証炉プログラムの基本設計を行う事業者として採択されました。JAEAはNNLと連携して、HTTR建設を通じて蓄積された我が国の高温ガス炉技術の国外実証を進めるとともに、第三国展開を通じて国際標準化を目指していきます。
HTTRで目標とされている水素製造コスト10～20円/Nm ³ に対して、現状のコスト評価（原子炉、水素製造）について他の競合技術と比較した結果があれば教えていただきたいと思います。また、今後のコストダウンの方策についてもご検討されている範囲で結構ですので併せてご教示ください。	高温ガス炉とISプロセスを組み合わせた場合の水素製造コストは、25.4円/Nm ³ と試算しています※1。また、OECD/NEAは、高温ガス炉と高温水蒸気電解法を組み合わせた水素製造コストとして、2.08 USD/kg（28円/Nm ³ @150円/USD）と試算しています※2。今後、研究開発の進捗に応じてコストを評価することが必須ですが、高温ガス炉は高温熱供給が可能であり、電気と水素のコジェネレーションによるコストダウンの方策を検討中です。 ※1 岩月ほか、高温ガス炉ISプロセス水素製造システムの経済性評価、JAEA-Review 2014-037 (2014) ※2 OECD/NEA, The Role of Nuclear Power in the Hydrogen Economy:Cost and Competitiveness, NEA No.7630 (2022).
課題の中に再処理技術とありましたが、本来、再処理をしない直接処分の概念で設計された炉と認識しています。再処理技術開発は意味があるのでしょうか？	我が国は使用済燃料は全量再処理する方針としており、高温ガス炉においても国の方針・政策に則り、再処理技術の開発を行う計画です。

質 問	回 答
<p>冒頭の理事長の講演で、ニュークリアとリニューアブルをつなぐキーテクノロジーは、今ご説明があったウラン蓄電池だと伺いましたが、これは現在どこまで開発が進んでいて、どのようなスケジュールで実用化を見込んでいるのですか。</p> <p>また通常の蓄電池と比較してコストはどうなりますか。</p>	<p>本技術については現在は原理実証の段階です。原理実証が成功すれば数年以内に卓上サイズでの開発にステージを移すこととなります。レドックスフロー電池は大容量および低ランニングコストの観点から大変魅力がある蓄電池です。電池の活物質として現在用いられているバナジウムをウランに置き換えることができれば、準国産の蓄電池を構築することができ且つ資源の有効利用に繋がります。</p>
<p>使用済燃料から希土類元素や白金族元素を抽出するとのお話ですが、これはよく話題になる都市鉱山、例えば廃棄された電子機器からの回収との比較で、十分に競合できそうなものなのでしょうか。資源量とコストの両方について教えてください</p>	<p>希土類元素や白金族元素等の供給源多角化は、我が国の資源セキュリティ確保の点から重要と考えています。都市鉱山に競合できるかどうかは、産業ニーズ、原子力政策や原子力発電の割合、国際情勢や社会的受容性など様々な点を考慮する必要があります。単なる議論はできません（資源量とコスト共に議論できる段階には無いのが現状です）。</p>
<p>OHP14ページで「ボールド下線：世界初」とありますが、それらはどれも未来のことなので、世界初なのは当たり前のように感じますが、取らぬ狸の皮算用ではないですか。</p>	<p>ご指摘の通り、「この成果を達成すれば、現時点で世界初といえる成果」を示しております。</p>
<p>レドックスフロー電池の原理をもう少し教えてください。</p> <p>特に、なぜ、利用サイクル数が無制限となるのかを詳しくお願いします。</p> <p>もし利用サイクル数が無限だとすると、蓄電池にあるバッテリー寿命は考慮しなくても良いということでしょうか。</p>	<p>レドックスフロー電池は、電極ではなく、電解液でのイオンの酸化還元反応を利用して充放電を行います。そのため、電極や電解液の劣化が極めて少なく、利用サイクル数が無制限とされています。一方で製品としての電池を考えた場合、溶液のタンクやセルなどの材料劣化が考えられます。ご指摘の通り、蓄電池としての寿命を考える必要があります（バナジウムレドックスフロー電池の寿命は約20年ほどとされています）。</p>
<p>レドックスフロー蓄電池の用途に関して、兎角電気エネルギーの発生源のように思われがちですが、電力会社は変動を有する再生可能エネルギーの補償用または系統安定用に使っていますので、放電回数に際限ないこの蓄電池は極めて有効です。</p> <p>一方でFIT契約が浸透すると、電力会社の系統安定用の用途は減りますが貴機構はこの点について、どのような展望をお持ちでしょうか。</p>	<p>仮に系統安定用の用途が減少したとしても、再生可能エネルギー利用においては電力需要に対するピークシフトも必要になるため、ピークシフトに対してレドックスフロー電池を活用できればと考えています。</p>
<p>熱電素子の放射線での劣化とはどのようなメカニズムなのでしょうか。</p>	<p>半導体で構成される従来型の熱電素子の場合、放射線粒子が入射した時に半導体を構成する原子が衝突によって弾き出されます。それにより結晶欠陥が生成されバルク損傷に至り、結果として性能が劣化します。</p>
<p>実際の劣化を観察した際には、どのようになったのかをご教示いただけますか。</p> <p>具体的には性能が低下するのでしょうか。</p> <p>また熱による材料拡散が原因の劣化とは切り分けられるのでしょうか。</p>	<p>市販の半導体熱電素子へ照射した場合は、素子を構成する樹脂部分が著しく損傷し、半壊状態となります。半導体部分については、外観は変わりませんが、電気特性に変化が現れ、照射量に応じて性能が低下します。また、照射により生じる結晶欠陥は熱による原子拡散を促進させます。これにより中性子脆化に代表されるように成分元素の析出や空隙の発生、局所的なアモルファス化・結晶化といった特徴的な微細構造を示します。その意味で熱による材料拡散と単純には切り分けられないと考えています。</p>

質 問	回 答
<p>熱電素子の放射線での劣化について、報告資料や特許文献等がありましたらご紹介ください。</p>	<p>BiTe系熱電材料へのプロトンおよびガンマ線照射に関する論文の一部をご紹介します。</p> <p>[1] G. Fu et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 358 (2015) 229–235 http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2015.06.039</p> <p>[2] M. J. Smith, J. Appl. Phys. 34, 2879–2884 (1963) https://doi.org/10.1063/1.1729824</p>
<p>劣化ウラン16000トンを資源として有効に活用することについて、劣化ウランは濃縮のテイルが主流だと思うので、フッ化物 (UF₆)として気体状態でシリンダーに保管されています。 16000トンの内訳、根拠を教えてください。</p>	<p>こちらの資料のp6に基づいています。</p> <p>http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2022/siryo26/2_haifu.pdf</p>
<p>UF₆をU₃O₈の酸化物にして固体状にするには転換工場が必要になります。 このことも含めてコスト評価についても教えてください。</p>	<p>ご指摘の通り、URF電池の実現のためには、UF₆を液体にまで転換する必要があると考えています。一方でウランレドックスフロー蓄電池の開発は原理実証の段階にあるため、どのような溶液で電池を構築するかは今後の検討課題としています。従いまして転換に関するコストは未評価の段階です。</p>