せとふみの e report レポート

「脱炭素を目指す取り組み」

高温ガス炉

CO_2削減への貢献が期待される次世代原子炉「高温ガス炉」が今注目されています。高温ガス炉は、世界で唯一950℃の熱を取り出せる高温供給源として開発され、現在高温工学試験研究炉として稼働中です。高温ガスの利用で発電する次世代型発電のほか、今後水素製造も可能となるなど、脱炭素社会の実現に向けて大きな役割が期待されています。今回はサイエンスライターせとふみさんが国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所を取材し、高温ガス炉の今についてわかりやすくレポートします。

今回の取材のポイント

ナビゲーター
せとふみさん

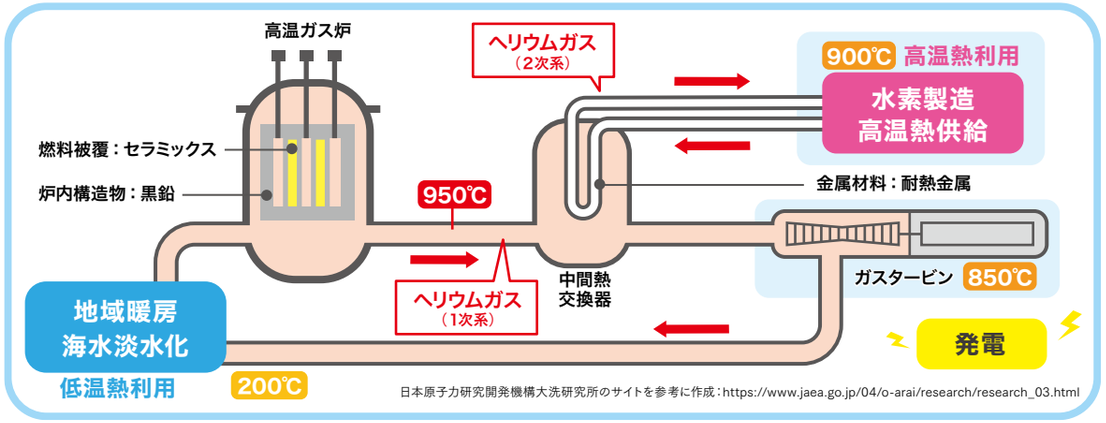
- POINT 01 HTTRとは？
- POINT 02 どんな技術が使われているの？
- POINT 03 水素との関係は？
- POINT 04 今後の展開は？

取材先概要 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 大洗研究所高温ガス炉研究開発センター

所在地	茨城県東茨城郡大洗町
原子炉出力	30MW
原子炉出口温度	950℃（最高）
1次冷却材	ヘリウムガス
1次冷却材圧力	4.0MPa
炉心構造材	黒鉛
燃料	二酸化ウラン

副センター長の篠﨑正幸さん（左）、竹上弘彰さん（右）

図1 ● 高温ガス炉とは



日本原子力研究開発機構大洗研究所のサイトを参考に作成：https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/research/research_03.html

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）の大洗研究所は、JR水戸駅から車で30分ほど移動したところにあります。もとは日本原子力研究所大洗研究所と核燃料サイクル開発機構大洗工学センターという隣接した2つの研究施設が、統合によって敷地面積160万㎡という、広大かつ国内外でも屈指の新型原子炉の研究開発拠点となったのです。

事前の申し込みと厳重なチェックを受けないと立ち入ることができない研究所内には、3つの原子炉があります（うち1つは廃止措置中）。今回見学させてもらうのはそのうちの1つ、東日本大震災を受けて停止していた運転を、2021年7月、約10年ぶりに再開した日本で唯一の高温ガス炉の試験研究炉「HTTR（高温工学試験研究炉）」です。高温ガス炉とはヘリウムガスで950℃の熱を取り出す原子炉です【図1】。大洗研究所副所長であり、高温ガス炉研究開発センター長を兼務する西原哲夫さんと、副センター長の篠﨑正幸さん、水素・熱利用研究開発部カーボンフリー水素研究開発グループグループリーダーの竹上弘彰さんにお話を伺いました。

大洗研究所副所長と高温ガス炉研究開発センター長を兼務する西原哲夫さん。施設全体の概要と研究方針について丁寧に説明してくれました。

『POINT 01 従来の原子炉（軽水炉）の約3倍、950℃もの高温熱を取り出せる！』

現在、発電用途に使われている原子炉は「軽水炉」と呼ばれ、核分裂によって発生した熱を取り出す役目である「冷却材」に水を利用してい

ます。熱エネルギーによって水を蒸気に変え、その蒸気によってタービンを回転させて発電を行っています。原子炉からタービンに送られるときの蒸気の温度は約300℃です。核分裂で発生する膨大な熱エネルギーを無駄にせず効率よく取り出すためには、安全性を確保したまま、冷却材の温度を高くする必要があります。

そのため、冷却材として水の代わりに高温でも安定なガスであるヘリウムを利用することにしたのが、次世代原子炉であるこのHTTRです。高温ガス炉とも呼ばれ、その名の通りヘリウムガスを950℃もの高温に加熱し、熱エネルギーを取り出すことができます。

次世代と言っても研究開発は軽水炉と同じくらい長期間、行われてきています。このHTTRは、1991年に着工し、1998年に運転を開始しました。数々の段階を経て、2010年には950℃・熱出力30MWで50日間の連続運転を実現し、継続的な運転が可能であることを示しました。東日本大震災を機に強化された原子炉設置の規制基準に対応するため震災直後の2011年から運転を休止していましたが、基準をクリアして2021年、約10年ぶりに運転を再開したのです。

水蒸気も圧力を高めれば高温にできるけど、設備が高温・高圧に耐えられないといけない。ヘリウムガスなら900℃以上でも圧力10MPa以下！水蒸気よりずっと低い圧力で高温を取り出せるよ。

『POINT 02 高温に耐えられるようにセラミックス材料を利用』

高温熱を取り出すために冷却材としてヘリウムガスを利用しているHTTRですが、冷却材だけではなく燃料や炉本体、周辺の装置も高熱に耐えられる必要があります。

燃料となるウランは直径約1㎜ほどの小さな粒子ですが、炭素や炭化ケイ素からなるセラミックスで4重にも覆われて、放射性物質を内部に封じ込めています。この燃料粒子は熱に強く、およそ1600℃の高温になるまで壊れることはありません。その燃料粒子を黒鉛粉末と混ぜて焼き固めて燃料（燃料コンパクトと呼ばれる）とし、さらにそれを黒鉛の筒に納めて、燃料棒が作られます。その燃料棒を納める炉内構造物も、耐熱温度2500℃という特別な黒鉛材料でできています。

「非常に緻密に焼成され、圧縮成形された黒鉛です。同じ炭素からなる素材でも、炭のように燃えることはありません」。

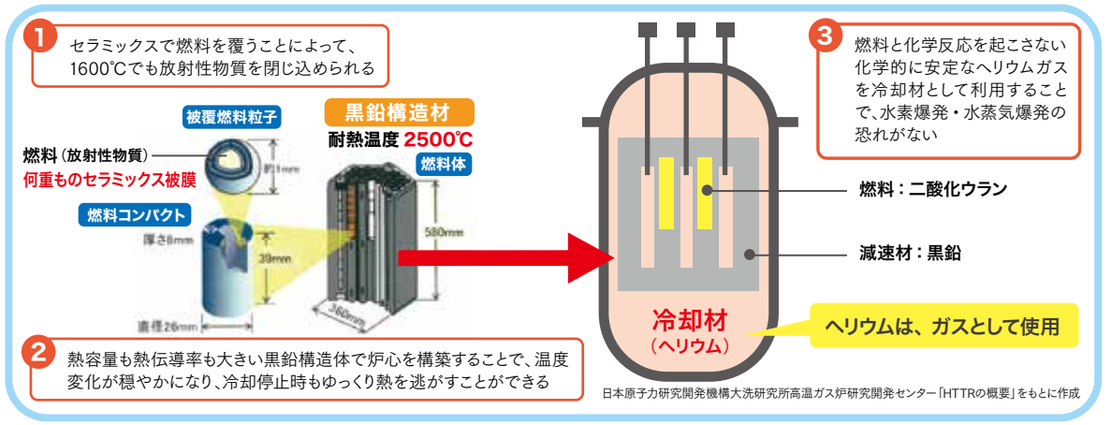
実際に使われているのと同じ黒鉛素材の燃料棒を手に、説明してくれる副センター長の篠崎正幸さん。燃料棒や炉内構造材として使用されている黒鉛は、触ってみると同じ黒鉛を材料とする鉛筆の芯のような柔らかさはまるでなく、金属のような艶やかさと硬さが感じられます。

「燃料も炉内構造材も熱に強いため、燃料が溶け出して炉を壊すといった炉心溶融が発生する恐れはありません。また、冷却材に水を使わないので、水素爆発や水蒸気爆発を起こすこともないのです」。

HTTRの安全性を説明してくれたのは、西原哲夫さん。炉内構造材・減速材として、大熱容量・高熱伝導性を有する黒鉛材料を用いることで、原子炉の冷却が停止した場合もゆっくりと熱を逃がすという安全性を実証試験で確認しています。黒鉛材料も、中間熱交換器に使われている高温に耐える金属も、日本製であり、このHTTRは、国産の技術のみで建設が可能であるとともに、世界にその技術を発信しています【図2】。

「減速材」とは炉内で核分裂により発生した中性子が飛び回るスピードを落として核分裂が起きやすい状態にするもの！軽水炉では水が使われているよ。

図2 ● HTTRの特徴



日本原子力研究開発機構大洗研究所高温ガス炉研究開発センター「HTTRの概要」をもとに作成

燃料格納や炉内構造材として用いられている黒鉛材料でできている六角形のブロック。

副センター長の篠崎正幸さんが手にしているのが、燃料棒のサンプル。こちらも黒鉛材料で作られています。

高温に耐えられる金属材料で作られている、中間熱交換器。金属の壁を介して原子炉の熱を運んできた1次系のヘリウムから、2次系のヘリウムに熱エネルギーを移し、放射線を外に出すことなく、エネルギーを取り出します。

POINT 03 カーボンフリーの水素製造は高温ならではのチャレンジ！

安全性が高く、高温熱を得ることができるというＨＴＴＲ。その用途は発電だけではなく、水素製造にも期待されています。以前に、水の電気分解による水素製造についてレポートしましたが、高熱を直接用いる水の熱分解だと、より高効率に水素を製造することができます。

「水を直接、水素に分解するのにはとてつもない高温が必要ですが、ヨウ素（Ｉ）と硫黄（Ｓ）を含む３つの化学反応で水を分解するＩＳ法という方法を用いることで、８００～９００℃くらいの温度で水から水素を生成することができます。ＨＴＴＲで得られる高温を無駄なく使えるのです」。

そう説明するのは、水素製造技術に取り組んでいる竹上弘彰さん。現在は電気ヒーターを用いて加熱し、ＩＳ法により水素が生成可能であることを確認した段階です。ゆくゆくはＨＴＴＲに隣接した場所にＩＳ法による水素製造施設を設置し、カーボンフリーの水素を生成しようと研究を進めているところです。

「原子炉に隣接して水素製造施設を造るのは、これまで他に例のない試みで、安全性を確認して法的な許認可を得るところから始めなくてはなりません」。

ＩＳ法の原理そのものは海外で発見されたものですが、プロセスの途中で発生する腐食性が高いヨウ化水素に耐えられる構造部品の設計・製造や、水素を連続的に製造する技術を確立させたのはこの研究所です。ＩＳ法の研究開発と並行して、高温ガス炉からの熱を取り出して水素製造に利用できるようにするため、まずは技術が確立されている別の水素製造法をＨＴＴＲに接続した水素製造の実証試験が進められています。【図３】。

竹上弘彰さんが手にしているのは、金属の内部をガラスで覆い、腐食に耐えられるようにした配管部品。

IS 法による水素製造実験プラント。いずれは HTTR と組み合わせて、グリーン水素の生成に用いられる予定です。

POINT 04 目指す将来像は水素製造も発電も両方できるCo-Generation！

これまで高温ガス炉の利点ばかり述べてきましたが、水と比べるとヘリウムガスの取り扱いが難しいことや、大型化には向かないといった弱点もあります。そのため、主に発電用途に用いられている軽水炉との使い分けが想定されています。

「我々が提案している高温ガス炉の将来像は、Co-Generationです。高温熱を利用した水素製造と、蒸気タービンや直接ヘリウムガスでタービンを回す発電の両方を行うことで、水素と電気、どちらの需要にも応えられるのは高温ガス炉ならではです」。

図３ ● 水素製造施設とHTTRを組み合わせた将来イメージ

太陽光や風力発電といった再生可能エネルギーは、天候や季節によって出力変動が生じる恐れがあります。ヘリウムガスでタービンを回し直接発電を行うことができれば、高温ガス炉から得られる熱エネルギーを、水素製造と発電、そのとき必要な方に即時にバランスよく分配し、不足を補うことができます。ヘリウムガスタービンの研究開発も、今後行う計画があります。環境に負担をかけない安全な技術のために、多くの研究開発成果が積み重ねられ、一つひとつ実を結んでいきます。

サイエンスライター
瀬戸（せと） 文美（ふみ）

2008年東北大学大学院工学研究科バイオロボティクス専攻博士後期課程修了、博士（工学）。人間協調型ロボットの研究をしていた学生時代からロボット技術を中心とした解説やレポート記事を執筆。千葉工業大学未来ロボット技術研究センター（fuRo）主任研究員や東北大学男女共同参画推進センター特任助教（運営）などを経て、現在は「物書きエンジニア」として科学技術の魅力を伝える活動を行っている。著書に「絵でわかるロボットのしくみ（講談社/2014）」などがある。