



**OECD/NEA（経済協力開発機構／原子力機関）  
「高温ガス炉と産業用熱利用」報告書  
（2022年6月16日発表）**

**ポイント紹介**

**（一社）日本原子力産業協会  
情報・コミュニケーション部  
2022年7月**

# OECD/NEA「高温ガス炉と産業用熱利用」(2022年6月)

Nuclear Technology Development and Economics  
2022

## High-temperature Gas-cooled Reactors and Industrial Heat Applications



## 目次

略語・頭文字一覧

## エグゼクティブサマリー

### 第1章. 背景

### 第2章. 産業用熱供給の高温ガス炉の概要

- 2.1. 高温ガス炉の定義と歴史
- 2.2. 高温ガス炉の技術的特徴
- 2.3. 産業用熱供給における高温ガス炉の潜在的な利点
- 2.4. 産業用熱供給における高温ガス炉のコスト
- 2.5. 高温ガス炉開発のための国内外プログラム

### 第3章. 高温ガス炉による熱の産業利用可能性

- 3.1. 高温ガス炉の熱利用の潜在的市場に関する主要な側面
- 3.2. 高温ガス炉の産業プロセスへの利用可能性
- 3.3. その他の低炭素熱供給源との競争力

### 第4章. 高温ガス炉の産業用熱供給における課題

- 4.1. 結合・共同設置の安全性確保
- 4.2. 結合・共同設置の許認可
- 4.3. その他の運用上の要求事項
- 4.4. コストとスケジュールの予見性
- 4.5. 高温ガス炉の燃料サプライチェーン
- 4.6. ステークホルダーの受容性

### 第5章. 結論

その他図表など 計50頁

# エグゼクティブ・サマリー①

## 高温ガス炉（HTGR）は、産業部門の脱炭素化のための技術的解決策となる可能性がある

- 世界のエネルギー由来二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の約4分の1を占める産業部門の脱炭素化は、カーボンニュートラルの達成に不可欠である。しかし、この産業部門は大量の高温の熱を必要とするため、「脱炭素化が困難な部門」の一つと認識されている。現在、大量の高温の熱は、化石燃料の燃焼によって供給されている。代替として利用可能な低炭素技術はこれまでのところ、コストや商業競争力の面で課題がある
- 高温ガス炉（HTGR）は、フルセラミック燃料を使用するヘリウム冷却黒鉛減速型の核分裂炉技術であり、現在開発中の先進原子力技術の一つである。550℃以上の熱を大規模に安定供給できることから、エネルギー源の多様化により安定供給に貢献しつつ、産業用熱部門の脱炭素化に向けた現実的なオプションとなり得る
- 高温ガス炉は、半世紀以上にわたる開発の歴史があり、いくつかの実験炉や商用規模の実証炉の運転実績がある。特徴として、出力サイズ、運転（コジェネレーションを含む）、導入面で柔軟性があり、複数の産業用熱需要家の様々な要求に応える。原子力安全の観点から、最新の高温ガス炉は、三層構造等方性（TRISO）被覆燃料粒子や黒鉛減速材、ヘリウム冷却材といった固有の安全特性に依存するように設計することができ、これにより原子炉出力を非常に低いレベルで自己安定化し、事故時に崩壊熱や残留熱を受動的に除去することができる。TRISO燃料は、放射性物質を強固に閉じ込め、低い原子炉出力密度と黒鉛炉心構造の大きな熱容量により、事故時の原子炉温度が急激には上昇しない。この結果、事故後数日から1週間以上、運転員の介入や外部電源に頼ることなく、炉心温度は燃料の最高許容温度以下に保たれる。これらの強化された安全特性は、様々な解析や実験実証により証明されている

## エグゼクティブ・サマリー②

### 高温ガス炉の熱は様々な産業部門に適用可能であり、蒸気パイプラインシステムが利用可能になれば、最も近い将来、高温ガス炉の熱を利用する機会を得ることができる

- この原子力機関（NEA）の報告書は、様々な産業部門における高温ガス炉の熱の潜在的利用可能性を探ったものである。各産業部門における高温ガス炉の適用が容易か、あるいは困難かは主として、プロセス温度やシステムの適合性、プラントのエネルギー需要サイズで決まる。プロセス温度とシステム適合性の観点から、熱供給に蒸気パイプラインを利用する用途は、高温ガス炉の熱利用の最も近い将来の機会であると考えられる。このような用途には、地域暖房、海水淡水化、オイルサンドからのビチューメン回収、化学コンプレックス、ソーダ灰生産などがある。これらの用途は、既存の化石燃料焚きの蒸気ボイラーやコジェネレーションプラントをコジェネレーションモードの高温ガス炉に置き換えることで、比較的早く脱炭素化できる。他の用途は、後の段階で追加される可能性があり、プロセスの大幅な再設計や新技術の開発など、高温ガス炉による熱供給を統合するためのさらなる努力が必要である。プラントのエネルギー需要規模の観点から、高温ガス炉の拡張性と熱電併給能力により、産業界の顧客の様々なサイズと性能の要求を満たすことができる。またこの点から高温ガス炉は、フリート・アップローチによってシリーズ建設による経済性から利益を得ることができる

### 高温ガス炉による産業部門の脱炭素化の可能性は、先進的な低炭素水素製造方法と超高温ガス炉（VHTR）技術の開発によって最大化される

- 高温ガス炉の熱利用の至近の機会とは別に、プロセス改良のための工学的な取組は必要であるが、天然ガス改質による従来の水素、アンモニア製造プロセスに高温ガス炉の熱を利用することは可能である。しかし、この方法はエネルギー源の代替では対応できないプロセス関連の排出があるため、CO<sub>2</sub>排出量削減への貢献は15～30%にとどまる。したがって、水素やアンモニアが化石燃料に代わって産業や輸送の分野で使われるようになれば、全体の影響は小さくなるものの、輸送や産業における低炭素の代替燃料として水素、アンモニア、合成燃料の需要が今後劇的に増加すると考えられることから、かなりの量の炭素排出が残ると考えられる。高温水蒸気電解（HTSE）や熱化学サイクルなどの先進的な低炭素水素製造方法に高温ガス炉の熱と電力を利用すれば、水素とアンモニア製造のより徹底した脱炭素化を達成できるかもしれない。これらの方法は現在開発中あるいは実証段階であるが、電力のみに依存する低温電解よりもより高いエネルギー効率で水素を製造することができると期待されている。さらに長期的には、950℃以上の炉心出口温度を発生させ、900℃以上の高温ヘリウムを産業プロセスに供給する超高温ガス炉（VHTR）技術の開発により、高温の原子力熱を用いた水素製造の効率性と競争力がさらに高まる

## 高温ガス炉を産業用熱利用として展開するための課題と提言

- 高温ガス炉は技術的に成熟しており、産業用熱部門からの炭素排出削減に貢献する可能性があるにもかかわらず、この目的のために産業用プロセスに接続されたものではなく、この技術はまだ実用化されていない。その主な理由は、安価な化石燃料の利用可能性と炭素排出量削減のための不十分なインセンティブにある。この状況は現在変わりつつあり、高温ガス炉が産業用利用の脱炭素化のための効果的な手段として認識され、議論の中心になる可能性がある。しかし、産業界が高温ガス炉を産業用熱利用として開発・導入するにはまだ課題がある

### 1. 高温ガス炉と産業プロセスとの結合に関するサイトまたはプロセス固有の分析および実証

- 近年、産業のなかには、脱炭素化のための代替熱源として高温ガス炉の技術に関心を持ち始めているが、様々な問題に対する不確実性が、さらなるステップに踏み出すことを躊躇させている。それらには、既存のプロセスや設備との互換性、導入にかかるコストと時間、規制の影響などの不確実性が含まれる。高温ガス炉の運転に関する多くの既存研究があるが、実際の産業プロセスや設備と高温ガス炉の結合と併設を考慮したシステム全体に関する技術、経済、規制の実現可能性に関するさらなる研究は、産業界がこれらの不確実性を取り除き、この技術の適用性と便益を完全に定量化するのに役立つ。実際の設備を用いた実証プロジェクトの計画と実施は、高温ガス炉を用いた原子力コジェネレーション技術の展開に向けた最も説得力のある方法である。プロジェクト計画の初期段階における国の原子力規制当局との関わりは、規制の意味合いと許認可の道筋を明確にすることによって、そのようなプロジェクトの成功にも寄与する

### 2. 様々な部門の産業プレイヤーやより広範なステークホルダーとのコミュニケーションと協働

- 上記の課題に取り組むためには、より広範なステークホルダーの関与が必要である。技術的・運用的な観点から、原子力エネルギーと産業施設の潜在的な相互作用を理解し、システム全体を設計・評価するためには、原子力技術の開発者、潜在的な原子力事業者、そして関心のある産業用熱ユーザー間の協力が不可欠である。発電用原子力施設の典型的なケースとは異なり、産業用熱利用向けの高温ガス炉は産業施設に物理的に接続し、工業地域や時には住宅地の比較的近くに設置しなければならない。このことは、この原子力利用に対する公衆の理解と受容を得るために、より広いステークホルダーとの関わりが必要であることを意味する。最高レベルの原子力安全と環境保護を確保するとともに、高温ガス炉の先進的な安全性、産業界における利用、気候変動の緩和やエネルギー安全保障、国や地域の経済への貢献などその社会的便益に関する効果的な広報活動を展開することが推奨される

# エグゼクティブ・サマリー④

## 3. 規制スキームの明確化と協調

- 高温ガス炉の産業プロセスへの接続に関する原子力と関連する産業規制の管轄範囲と境界要件は、具体的なシステム構成とビジネススキームを開発するための基礎を提供するものである。このような規制スキームの確立には、原子力規制当局と関連産業分野の規制当局だけでなく、産業プレーヤーとの相互作用が必要である。プロジェクト計画の早い段階から、関連する産業界や規制機関が関与することは、そのようなプロジェクトを成功させるための産業スキームやシステム構成の効果的な開発に貢献する

## 4. HALEU燃料サプライチェーンのタイムリーな開発

- ウラン濃縮度が5～20%の高アッセイ低濃縮ウラン（HALEU）燃料の利用を確保することも重要な課題である。現在提案されている主要な商用高温ガス炉の概念は、すべてHALEU燃料に依存している。HALEU燃料の需要は、先進原子炉や在来型軽水炉の事故耐性燃料への関心の高まりを反映して、2020年代半ばから増加し、その後かなりの水準に達すると予想されている。現在、HALEU燃料は、大規模な高温ガス炉の展開を可能にするのに十分な量が生産されておらず、濃縮、再転換、輸送、成型加工を含むHALEU燃料供給能力の開発は、高温ガス炉や他の先進原子力技術の将来の開発、展開を支えるために重要である。また現在、NEA加盟国におけるHALEU燃料のノウハウや生産能力は限られている。この製造能力の開発には、多額の先行投資だけでなく、規制当局の認証を含む長い年月が必要であり、例えば、HALEUの濃縮能力の追加取得には、計画の提案から生産開始まで数年以上かかる。したがって、市場のリスクと不確実性を低減し、民間投資を促進するためには、このような先進原子炉技術の幅広い採用とHALEU燃料の入手の両方について明確な見通しが必要である

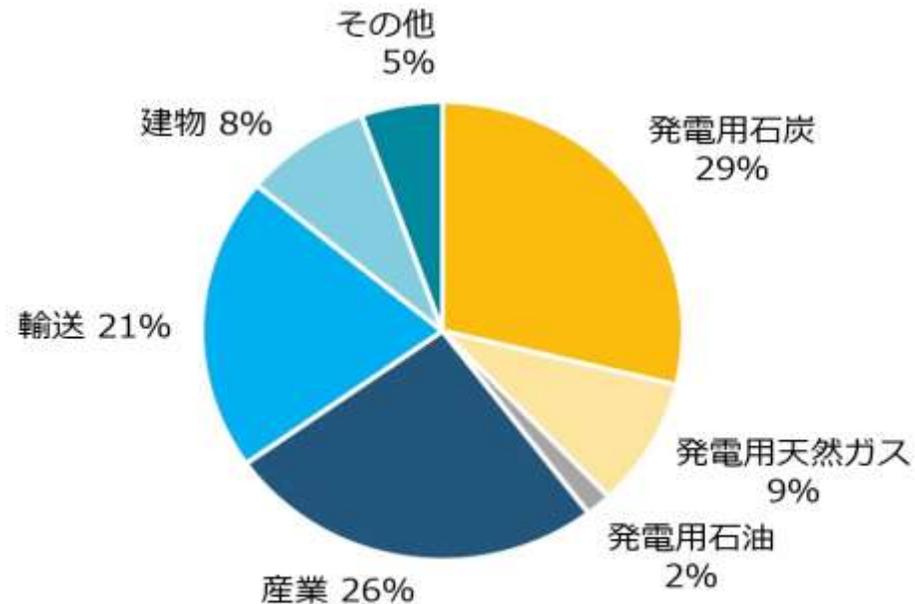
## 5. 政府による脱炭素化政策へのコミットメントと、予見性のある効果的なインセンティブスキームの提供

- 多くの革新的な脱炭素化技術と同様に、高温ガス炉の産業用熱利用を開発するには、長期的な取組と多額の投資を必要とする。サプライチェーンの開発、特にHALEU燃料の利用可能性のためには、多額の先行投資が必要であり、包括的かつタイムリーに構成される必要がある。適切な規制枠組を構築することに加えて、政府は、ビジネス環境の安定性と予見性を向上させることによって、この深い脱炭素化技術の開発と展開に関与する産業部門を奨励することができる。高温ガス炉の産業用熱利用の技術的・市場的経験の不足と、一般的に原子力プロジェクトに関連する高い資本費と長い資産寿命のために、民間部門と投資家がこうしたプロジェクトに関与するためには、リスク低減に対する政府のコミットメントが不可欠である。より現実的なレベルでは、低炭素技術を支援する市場スキームと補助金制度が、これらの技術から将来得られる収益について産業界に一定の見通しを提供するうえで重要な役割を果たす

# 背景

- 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）「1.5℃特別報告書」（2018年）は、2050年カーボンニュートラル達成が世界共通の目標となるべきと定めた
- 世界の温室効果ガス排出量の約4分の3はエネルギー部門が占めており、そのうちの約4分の1を占める産業部門では、高温で大規模な熱供給が必要であること、市場競争が激しいこと、資産寿命が長いことなどから、最も脱炭素化が難しい部門の一つ
- 原子力発電は、20世紀半ばに最初の原子力発電所が運転して以来、水力発電とともにエネルギー部門のCO<sub>2</sub>削減に貢献し、今後も貢献する。実際、原子力発電は先進国では最大の低炭素電源
- 原子力は発電だけでなく、低炭素なプロセス熱源（～約150℃まで）としても利用可能。これまで多くの国で原子力コージェネレーションにより、海水淡水化、製紙・ボール紙製造、重水製造、塩の精製などで利用
- 高温ガス炉は、現在開発中の先進的な原子炉技術の1つで、通常700℃以上の原子炉出口温度を発生させることが可能。そのため、低炭素の原子炉熱の利用範囲を拡大し、産業用熱分野の脱炭素化に貢献する可能性

◆世界のエネルギー関連CO<sub>2</sub>排出量（部門別、2020年）

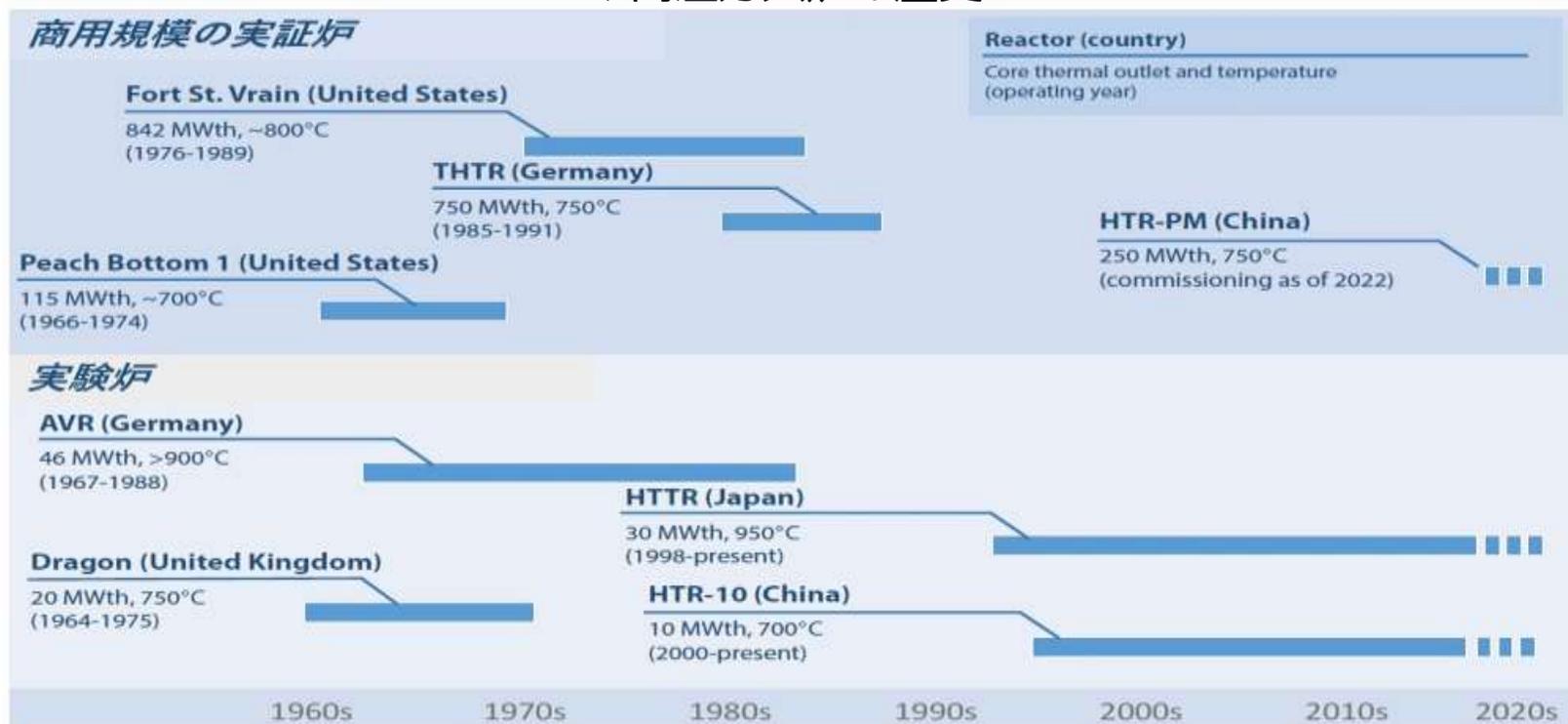


Notes: Emissions from industry sector include process emissions.  
Source: IEA, 2021.

# 高温ガス炉の定義と歴史

- 高温ガス炉は、フルセラミック燃料を使用するヘリウム冷却黒鉛減速型の核分裂炉技術であり、現在開発中の先進原子力技術の一つ。その特徴は、従来の原子炉技術と比べて固有の安全性と燃料や黒鉛の核分裂生成物閉じ込め性能が優れている点にある
- 原子炉出口温度は通常750℃から950℃で、従来の原子炉よりもかなり高い（PWRの標準的な原子炉出口温度は約320℃）
- 1945年に米国で初めて高温ガス炉の設計研究が提案され、1960年代には英国、米国、ドイツで実験用高温ガス炉が登場。その後、米国、ドイツで商用規模の実証炉が1970年代中旬～1990年代初頭まで運転。現在では、日本と中国で実験用高温ガス炉2基が運転中

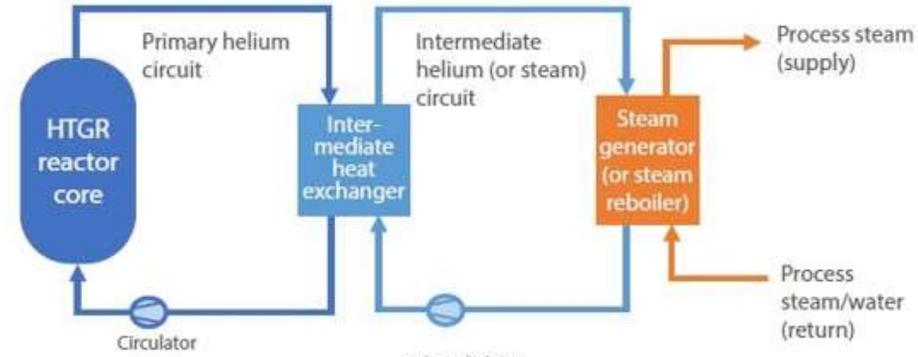
## ◆高温ガス炉の歴史



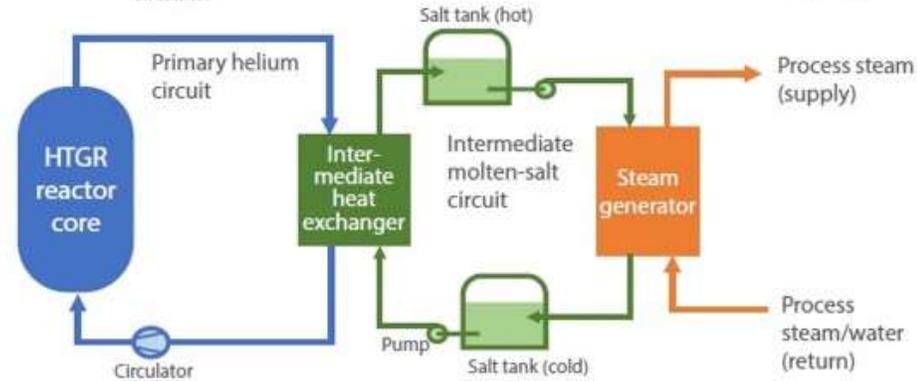
Source: Beck and Pincock, 2011; CNNC, 2021.

# 産業用プロセス蒸気供給のための高温ガス炉のシステム構成例

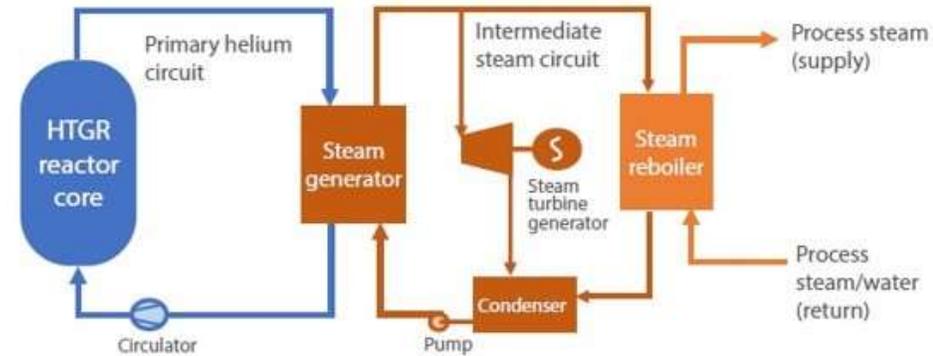
例1  
中間ヘリウム回路経由  
の蒸気供給システム



例2  
中間溶融塩回路経由  
の蒸気供給システム



例3  
蒸気タービン発電機に  
よるコージェネレーショ  
ンシステム



# さまざまな高温ガス炉の設計概念の技術仕様

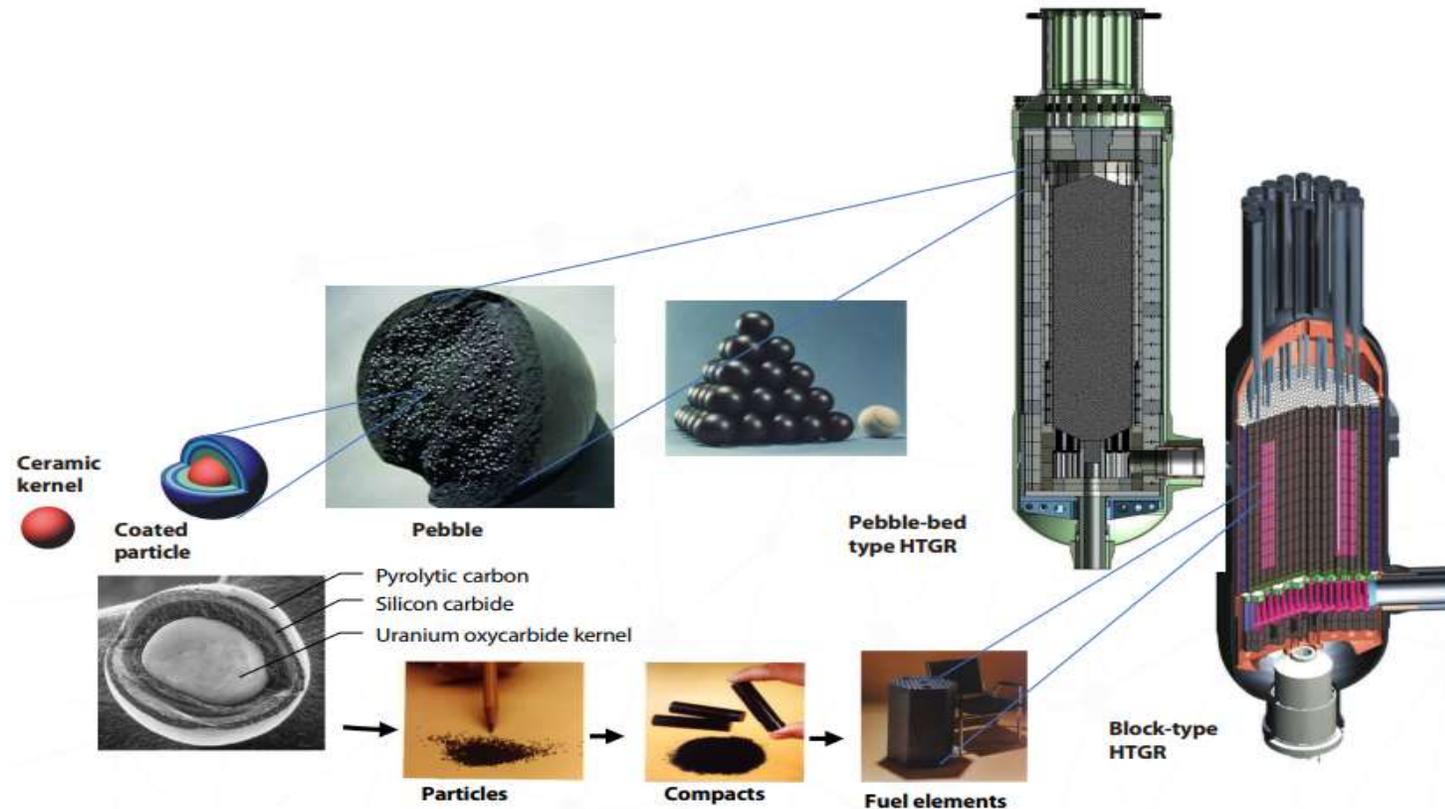
原子炉設計	SC-HTGR	GTHTTR300C	HTR-PM	Xe-100	MMR®	U-Battery	HTTR (試験炉)	HTR-10 (試験炉)
出力(MWth)	625	600	250	200	15	10	30	10
一次系冷却材	ヘリウム 750℃ 6.0MPa	ヘリウム 950℃ 5.1MPa	ヘリウム 750℃ 7.0MPa	ヘリウム 765℃ 6.0MPa	ヘリウム 630℃ 3.0MPa	ヘリウム	ヘリウム 850~950℃ 4.0MPa	ヘリウム 700℃ 3.0MPa
中間熱媒体	蒸気 560℃ 16MPa	ヘリウム 900℃ 5.15MPa	蒸気 567℃ 13.25MPa	蒸気 565℃ 16.5MPa	熔融塩 560℃ 0.5MPa	窒素 または ヘリウム 710℃	ヘリウム 775-905℃ 4.1MPa	---
燃料種類	TRISO燃料	TRISO燃料	TRISO燃料	TRISO燃料	TRISO燃料	TRISO燃料	TRISO燃料	TRISO燃料
燃料と濃縮度	UCO 15.5%	UO <sub>2</sub> ,MOX 14.3%	UO <sub>2</sub> 8.5%	UCO 15.5%	UO <sub>2</sub> 9-13%	UO <sub>2</sub> <20%	UO <sub>2</sub> 3.4-9.9%	UO <sub>2</sub> 17%
コア組立タイプ	ブロック	ブロック	ペブルベッド	ペブルベッド	ブロック	ブロック	ブロック	ペブルベッド
設計寿命	80年	60年	40年	60年	20年	30年	~20年 (運転時間)	20年
燃料交換サイクル	18~24か月	18~24か月	運転中燃料交換	運転中燃料交換	燃料交換なし	N/A	---	運転中燃料交換
プラント面積 (m <sup>2</sup> )	10,000	63,000 (4基のモジュール)	43,000 (12基のモジュールレイアウト)	131,000 (4基のモジュールレイアウト)	12,000	350	60,000	13,000
開発状況	概念設計	基本設計	試運転中	基本設計	基本設計	概念設計	運転中	運転中
設計者	フラマトム	JAEA	清華大学	X-energy LLC	USNC	U-Battery	JAEA	清華大学
国	米国	日本	中国	米国	米国	英国	日本	中国

Source: IAEA, 2020; GFP, 2019; Mulder, 2019; U-battery, 2022; Venneri, 2019; Yan et al., 2018; Yan, 2017

# 高温ガス炉の安全特性

- **受動的安全特性**：耐熱性と閉じ込め性能を向上させた三構造等方性（TRISO）被覆燃料粒子、大きな熱容量と熱伝導の特性を持つ黒鉛減速材、化学的に不活性なヘリウム冷却材に依存。これらの特徴を組み合わせることで、事故時に機器の作動や運転員の操作なしに崩壊熱や残留熱を大気中に受動的に除去することが可能となり、炉心熔融状態を伴う過渡事象の発生確率を低減できる可能性
- **事故対応における運転員への依存低減**：原子炉の出力密度が低く、黒鉛炉心構造の熱容量が大きいいため、事故後の原子炉温度上昇が遅く、通常数日～1週間以上長い猶予期間を確保
- **核燃料の放射性物質の強固な閉じ込め性**：TRISO被覆粒子燃料は、核分裂生成物を1,600～1,800℃（最新の開発）に閉じ込めることができる高い耐熱性を有する。そのため、炉心内の事故最高温度が燃料が最高許容温度を超えないよう、設計することが可能

◆ペブルベッドタイプおよびブロックタイプの高温ガス炉向けTRISO被覆燃料

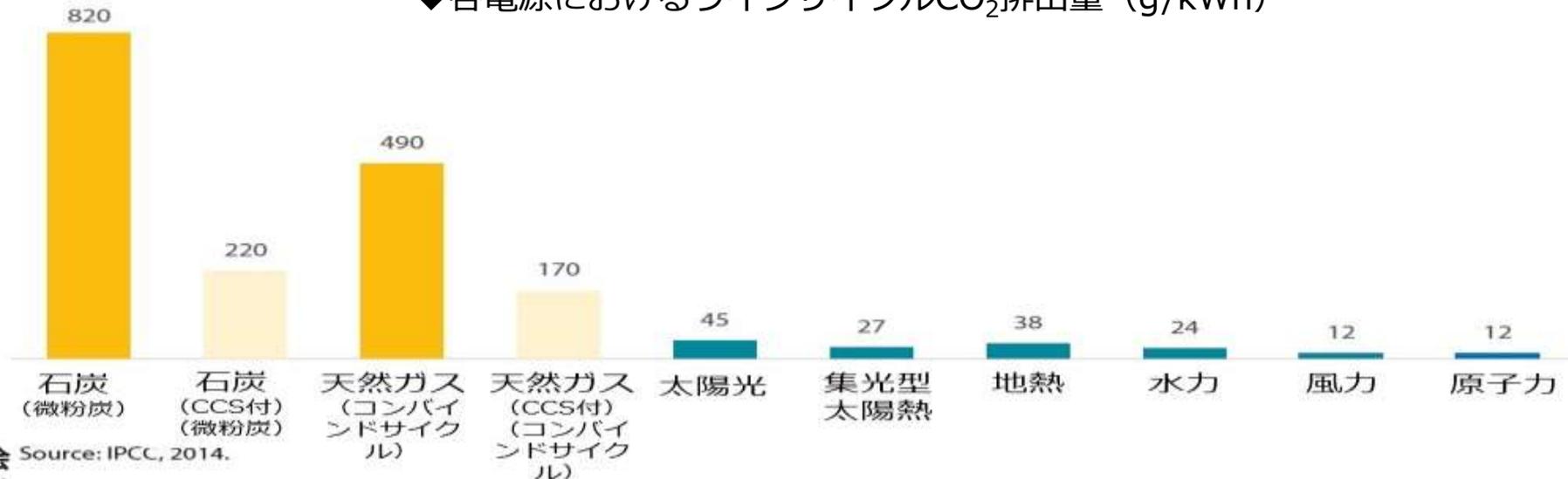


Source: Gougar, H.D., 2019.

# 産業用熱供給における高温ガス炉の潜在的な利点

- **低炭素エネルギー源**：原子力は、現在利用可能な技術のなかで最も温室効果ガスの排出が少ない技術の一つ。したがって、高温ガス炉の利用は、発電だけでなくプロセス熱供給を通じて、化石燃料の使用とそれに伴う炭素排出の削減に貢献する可能性
- **高温の熱供給**：高温域の産業用プロセスに熱を供給することが可能。現在、早期展開が提案されている典型的な高温ガス炉の概念は、約 550～700℃のプロセス熱を供給する。現在、このような高温熱供給を商業規模で産業用プロセスに広く展開できる低炭素技術はない
- **熱供給の信頼性と柔軟性**：従来の原子力発電所と同様、天候などの外的条件に強く、長期間安定した運転が可能。設計概念によっては、出力制御や熱・電力・蓄熱のダイナミックな切り替えにより、熱需要に応じた柔軟な運転が可能
- **供給の安全保障**：燃料資源は、ウランの採掘や濃縮度5%以上のウラン燃料の製造能力の開発に課題があるが、ウランの埋蔵量は豊富にあると推定。ウランの供給が比較的安定していること、運転コストに占める燃料費の割合が小さいことから、供給の安全保障に寄与し、エネルギーコストの大きな変動を回避できる可能性。またエネルギー源の多様化によりエネルギー安全保障を強化
- **設置の柔軟性**：現在提案されている高温ガス炉は、従来の原子炉よりも設置面積が小さく、事故時の炉心冷却に信頼できる水源を必要としないため、設置に関する地理的制約が従来の原子炉よりもはるかに小さい。高温ガス炉の設計によっては、複数基の設置により拡張可能

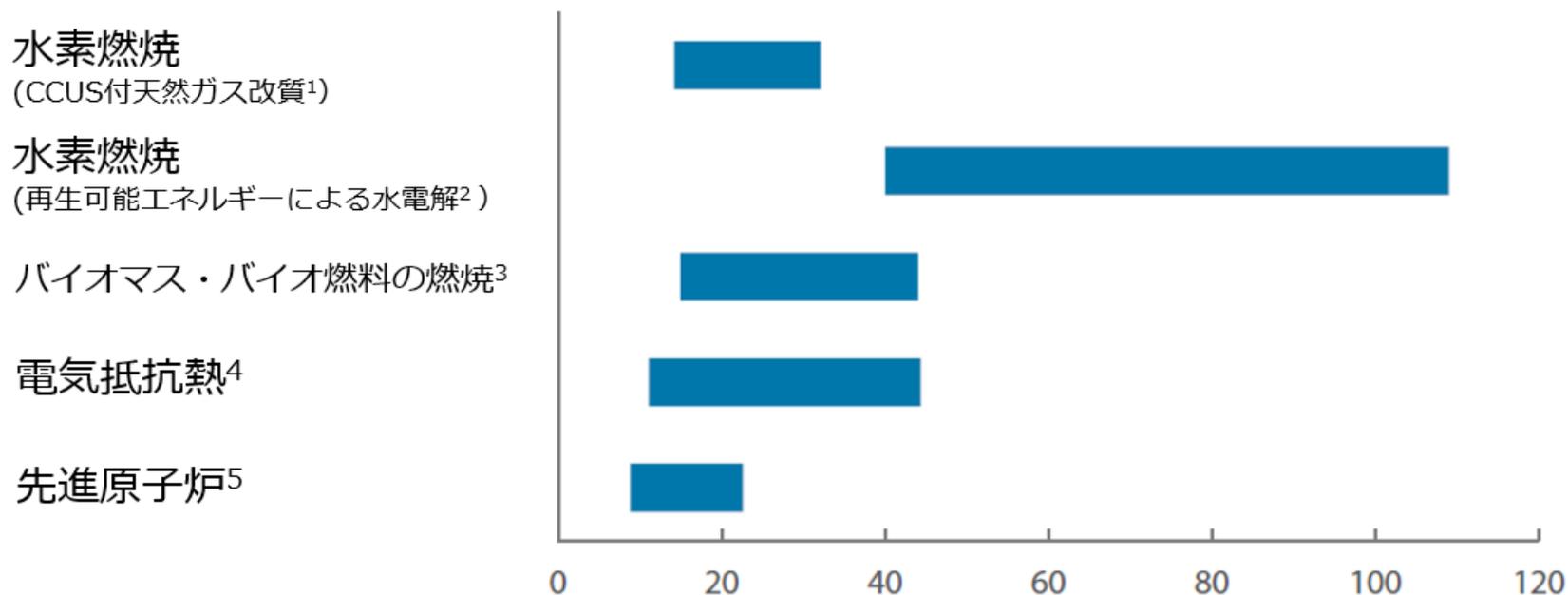
◆各電源におけるライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量 (g/kWh)



# 産業用熱供給における高温ガス炉のコスト

- 高温ガス炉による産業用熱供給のコスト試算に関する情報は限られているが、一定の条件の下では既存の化石燃料や他の代替熱源と比べてコスト面での優位性が示されている分析もある
- ポーランドの研究では、165MWthの小型モジュール高温ガス炉からのプロセス熱のコストは、天然ガスボイラーと同程度になると試算（割引率：4%、CO<sub>2</sub>価格> 20ユーロ/トン）
- コロンビア大学が産業用途の低炭素熱源の米国における一般的なコスト試算を実施したところ、大きな不確実性があるものの、HTGRを含む先進原子炉による熱の供給コストは、他の低炭素熱源よりも低くなる可能性があることを示唆

## ◆コロンビア大学による低炭素熱源の一般的なコスト試算（2019年）



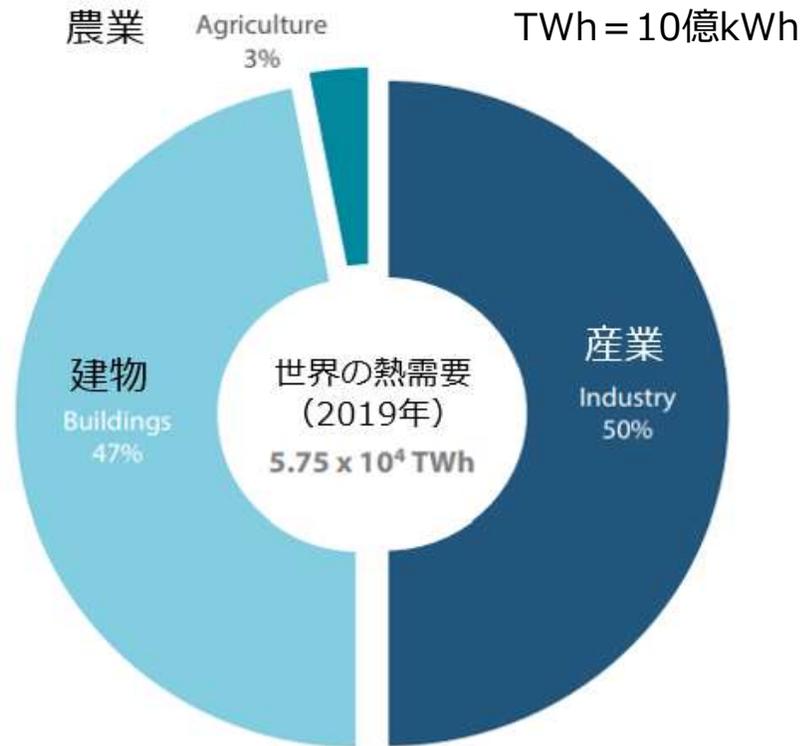
1. 天然ガスコストは3.5 USドル/MBtu, CCUS回収率は89%と想定
2. 再生可能エネルギーは、水力、風力、太陽光を含む
3. バイオマスには、木材、バイオ燃料を含む
4. 電力価格は40~120USドル/MWhとする
5. 「先進原子炉」とは、高温ガス炉を含む第4世代の原子炉を指す

Source: Friedmann, 2019.

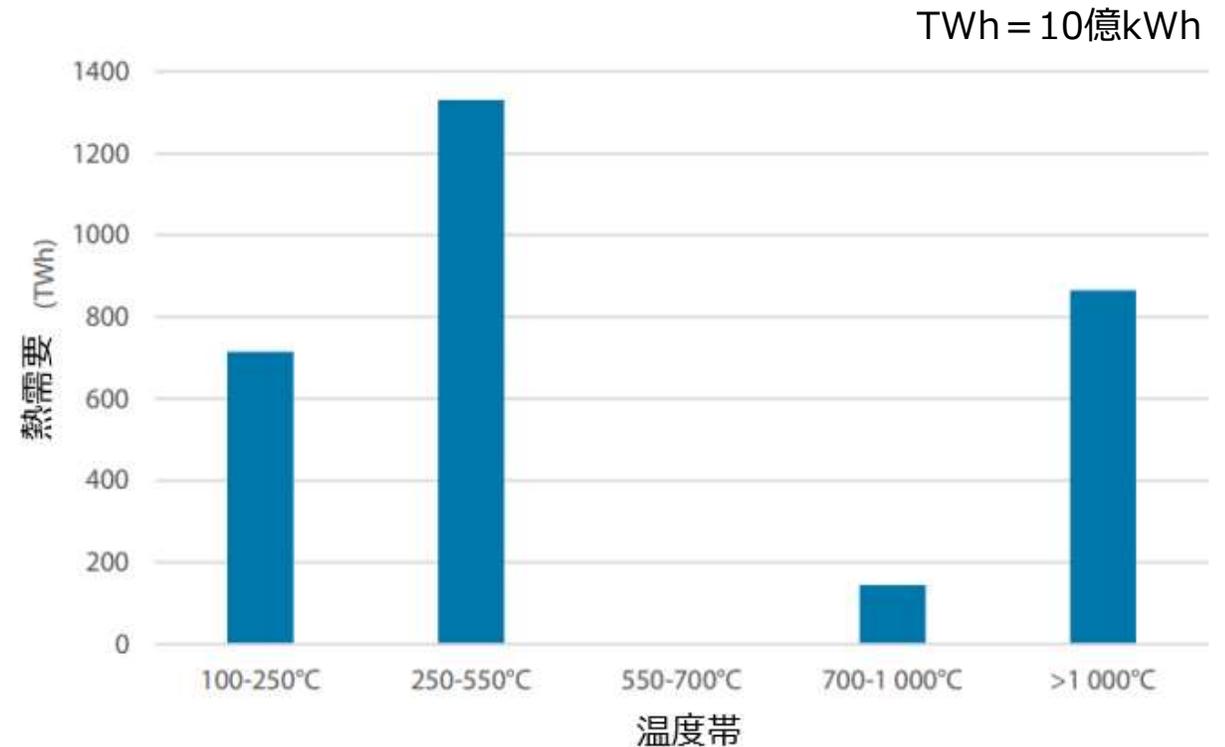
# 高温ガス炉による熱の産業利用可能性

- 世界の熱需要は着実に増加し、世界の最終エネルギー消費の半分を占めている。産業用熱は、2020年の総熱需要の約50%を占め、その約90%は化石燃料に依存し、そのうちのかなりの割合で高温の熱が必要
- 欧州レベルでは、産業用プロセス熱需要の4分の3以上が250℃以上の温度を必要とし、その半分以上が250～550℃の範囲にあると推定

◆世界の部門別熱需要と割合



◆欧州における温度別熱需要の分布



Source: Bredimas, 2012.

# 様々な産業部門における高温ガス炉の近い将来の利用可能性

産業	代表的なプロセス温度	近い将来の利用可能性	備考
◎ 地域暖房	80～150℃	"プラグイン"	既存の蒸気パイプラインが利用可能、ボトム利用
◎ 海水脱塩化	70～130℃	"プラグイン"	既存の蒸気パイプラインが利用可能、ボトム利用
○ パルプおよび製紙製造	100～400℃	"プラグイン"	特定の工学的取組が必要（揮発性熱負荷）
◎ オイルサンド（SAGD法, Steam Assisted Gravity Drainage）	約300℃	"プラグイン"	既存の蒸気パイプラインが利用可能
▲ オイルシェール（ex-situ retorting）	約500℃	"プラグイン"	主要プロセスの再設計に多大な工学的取組が必要（レトルトキルン）
○ 石油精製	350～550℃ 600～800℃（接触分解）	"プラグイン"	特定の工学的取組が必要（熱システムのバランス）
◎ 化学	250～600℃ 800～900℃（ナフサ分解）	"プラグイン"	既存の蒸気パイプラインが利用可能
◎ ソーダ灰製造（ソルベイ法）	300～400℃	"プラグイン"	既存の蒸気パイプラインが利用可能
○ アルミニウム製造	100～300℃（アルミナ水和） 800～1,000℃（アルミナ焼成）	"プラグイン"	特定の工学的取組が必要（熱システムの改造）
○ アンモニア製造 （天然ガス改質）	600～800℃（天然ガス改質） 400～500℃（アンモニア合成）	原材料の予熱	特定の工学的取組が必要（熱システムの改造）、貢献は限定的
		ヘリウム加熱改質	主要プロセスの再設計が必要（水蒸気改質器）の再設計が必要だが、技術はすでに利用可能
○ 水素製造（天然ガス改質）	約750℃	原材料の予熱	特定の工学的取組が必要（熱システムの改造）、貢献は限定的
		ヘリウム加熱改質	主要プロセスの再設計が必要（水蒸気改質器）の再設計が必要だが、技術はすでに利用可能
▲ 石灰、ガラス、セメント、セラミックス、非鉄金属	800～1500℃	原材料の予熱	さらなる分析が必要
▲ 鉄およびスチール製造	1,300～2,500℃	原材料の予熱	さらなる分析が必要

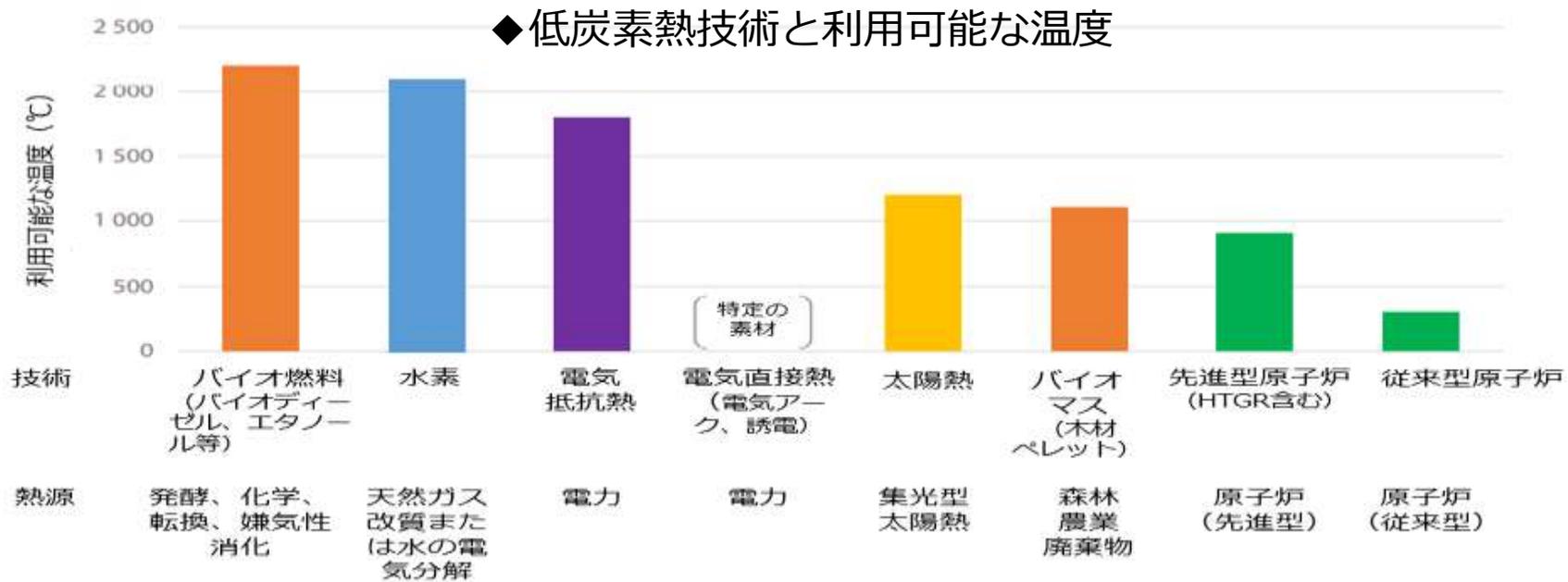
◎ 高温ガス炉の熱を統合するために、工学的取組をあまり必要としない産業

○ 高温ガス炉の熱を統合するために、中程度の工学的取組を必要とする産業

▲ 高温ガス炉の熱を統合するために、多大な工学的取組を必要とする、あるいはさらなる分析が必要な産業

# その他の低炭素熱供給源との競争力

- 代替熱源としての高温ガス炉の実際の市場機会は、競合する技術が利用可能かどうかにもよる。高温ガス炉の熱供給の温度範囲（将来的には 700℃または 900℃まで）については、CCUS による化石燃料ボイラー、バイオエネルギー、集光型太陽熱、水素、合成燃料、低炭素電力による電気熱など、いくつかの低炭素技術の選択肢が存在
- 現時点では、これらの低炭素・高温熱供給技術はいずれも開発途上であり、産業規模での実用化には至っていない。競合技術の利用可能性と経済性は、再生可能エネルギーを含む安価な低炭素電力、CO<sub>2</sub>貯蔵に適した地質条件、持続可能なバイオマスなど、必要な資源を大規模に利用できるかどうかによる
- 高温ガス炉は、これら資源へのアクセスが制限されている地域ではより有望な低炭素代替熱源となる。250℃以下のプロセス温度を持つ産業は、従来型原子炉のコジェネレーションで対応可能。従来の原子力によるコジェネレーションは、50 年以上にわたって世界で750炉年の運転実績がある証明された技術であり、この温度範囲の産業の脱炭素化には既に実行可能な選択肢と考えられる

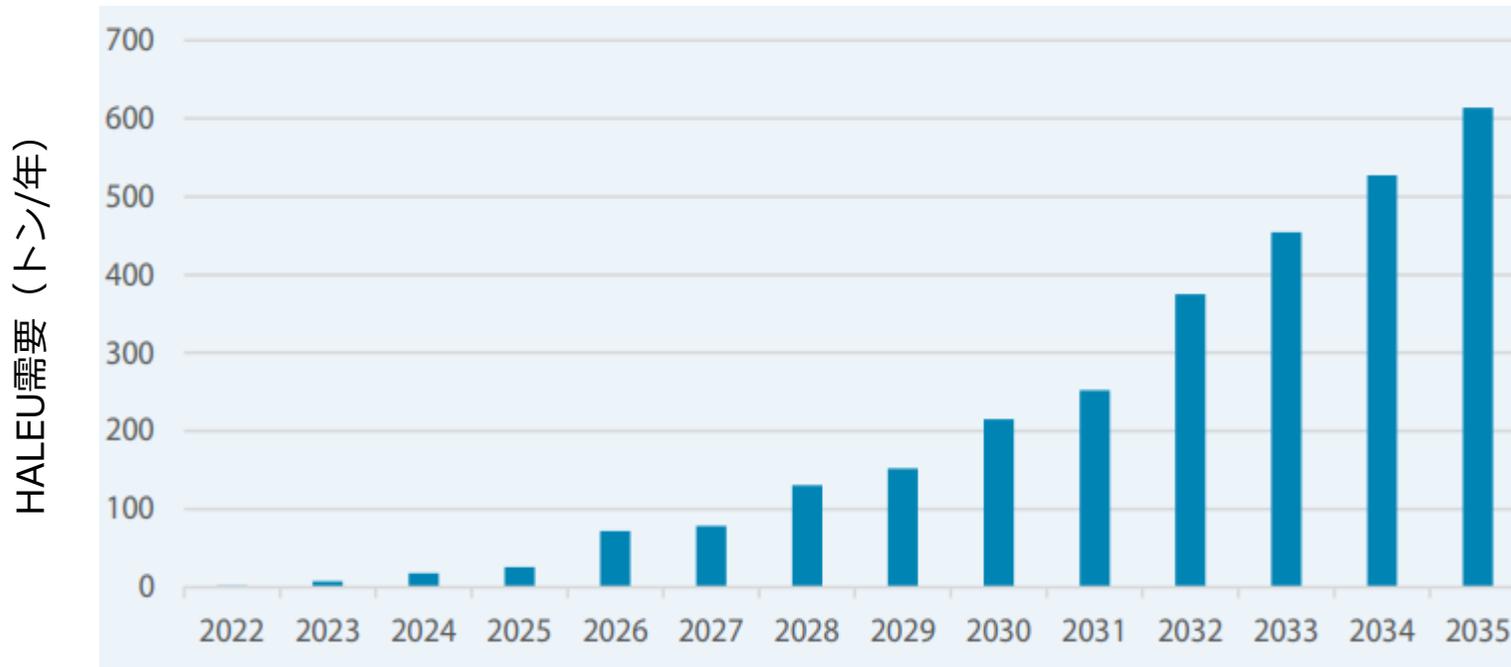


Source: Friedmann, Fan, and Tang, 2019.

# HALEU燃料の利用可能性における課題

- HALEU 燃料は、従来の軽水炉のためのいくつかの事故耐性燃料の概念とともに、小型モジュール炉を含む多くの先進原子炉の概念で検討されている。このことは、今後数十年の間にHALEU燃料の需要が急速に増加する可能性があることを既に示している
- 使用済研究炉燃料のダウブレディングや再処理、および米国とロシアにある高濃縮ウラン在庫は、短期的にいくつかのプロジェクトを支援するために、HALEU燃料供給に使用することができる。しかし、そのようなウラン資源の利用可能性が限られていることや将来の潜在的な需要が大きいため、さらなるHALEU濃縮能力の開発が不可欠
- HALEU生産能力の開発には莫大な先行投資と長いリードタイムが必要であり、規制当局の認証を含め、数年以上が必要。したがって、このような先進原子力技術の広範な採用とHALEU燃料の利用可能性の両方を可視化することが市場リスクと不確実性を低減し、民間投資を促進するために必要

◆米国とカナダにおけるHALEU需要予測



注：データは濃縮度5～10%のHALEU需要は除外。需要年とは、HALEUが燃料製造に使用される年であり、原子炉への装荷と運転はそれ以降の年に行われる

出典：NEI, 2021