

## 水素輸入と製品輸入の比較

— 水素直接還元製鉄を例にした水素利用の古くて新しい視点 —

電力・新エネルギーユニット 柴田善朗

### サマリー

水素は輸送が非常に困難である。国外で安価な水素を製造できたとしても、我が国への輸入を踏まえると、水素キャリアへの変換・輸送によるコスト増は不可避である。視点を変えてみると、水素を輸入して何らかの製品を製造するのと、水素が製造される国でその製品を製造し輸入するのと、どちらが経済的なのか、という問題があるのではなかろうか。

本稿では、この問題を、水素直接還元製鉄を例に分析した。その結果、水素製造国で水素を利用して製造した直接還元鉄を輸入するケースの直接還元鉄の日本への供給コストが、輸入水素を利用して国内で直接還元鉄を製造するケースの直接還元鉄製造コストよりも大幅に安価であることを示した。この結果が提起することは、水素キャリアの輸入コストの高低にのみフォーカスした議論ではなく、輸入水素を利用して国内で製品を製造することの経済性をどう考えるべきかという論点である。

エネルギー・資源・製品の輸入依存度の高い我が国は、国富流出抑制の観点から輸入コストを最小化する努力が求められる。水素を利用して製造される製品は、直接還元鉄以外にも数多くあり、本分析結果を一般化することはできない。しかしながら、いずれにせよ輸入を避けられないならば、物理的に輸送が非常に困難な水素の輸入に固執せず、国外で水素を利用し製造した製品を輸入するというオプションも検討すべきかもしれない。その場合は、個別の製品ごとに産業やサプライチェーンの状況に即した検討が極めて重要になる。

なお、今回の分析で事例として扱った直接還元鉄は、いわば「中間製品」であることにも留意する必要がある。「中間製品」である直接還元鉄の輸入を活用して、最終製品の製造に必要な高炉や電炉等の工程やそこからの下流のサプライチェーンを国内に残す<sup>1</sup>など、産業空洞化を最小限に留めるサプライチェーン全体としての最適化に向けた検討も重要になる。

別の見方をすると、産業空洞化を避けるために国内での製品製造を選択する場合、国産水素コストが輸入水素コストと同水準であれば、少なくとも国富流出を抑制できる国産水素

---

<sup>1</sup> 輸入する直接還元鉄を高炉や電炉に投入財（直接還元に適さない鉄鉱石やスクラップ鉄を補完）として用いることで、そこで必要なエネルギーの脱炭素化（CCS 活用等）は必要なものの、従来の製鉄（高炉・電炉）プロセスより大幅なCO<sub>2</sub>排出削減が可能になり、製鉄業にとって、脱炭素化を進めつつ、高炉・電炉及び下流部門の活用と最適化を図ることも可能となる。

の可能性を深堀する意義がある。その場合においても、コスト抑制の観点から、水素キャリアへの変換・輸送を最小限にとどめる必要がある。そのためには、近年データセンターの北海道への立地が進んでいる例が示すように、再エネが豊富で相対的に安価な地域への産業移転も検討する価値がある。そうすれば、需要拡大による再エネ普及拡大にも貢献できる。

元来、水素は水素キャリアに変換せずにガスのまま製造地近傍で利用することが効率的であるという原理からは逃れられない。用途によっては、水素輸入を所与とせずに、経済や産業への影響を踏まえた多角的な視点に基づく議論が求められる。

## はじめに

水素は脱炭素に向け重要な役割を担うことが期待されている。一方で、水素の活用を考える際に改めて認識しなければならないのは、輸送が非常に困難という点である。大量の水素をいかに経済合理的に海外から長距離輸送するかは我が国にとって長年の課題であり、多様な水素キャリアの技術開発が行われている。しかしながら、視点を変えてみると、必ずしも水素を輸送するのではなく、水素が製造される場所で水素を利用するという考え方もあり得る。本稿では、工業用原料として利用される水素を対象として、輸入水素を利用して国内で製品を製造するケースと、国外で水素を利用して製造した製品を輸入するケースを想定し、これらの経済性を比較し、その上でメリット・デメリットについて考察する。

## 水素直接還元製鉄を例に

鉄鋼部門の脱炭素に向けて、主に、高炉水素還元、大型電炉、水素直接還元製鉄に対する技術開発が取組まれている<sup>2,3,4</sup>。高炉水素還元については、水素還元と CCUS によって 30% の CO<sub>2</sub> 排出削減を目標とする Course 50 プロジェクト、及び 50% の CO<sub>2</sub> 排出削減を目指す Super Course 50 プロジェクトにおいて研究開発が進められている。大型電炉については、鉄スクラップ等を原料とした高級鋼製造の技術開発を目指した取組みがある。

これに対して、水素直接還元製鉄に関しては、多様な技術的課題はあるものの<sup>5</sup>、類似の技術である天然ガス（メタン）による直接還元製鉄の歴史は長く、1969 年の商用化以来、生産量も大幅に拡大している<sup>6</sup>。近年は、水素直接還元製鉄についても、研究開発・実証が進められ<sup>7</sup>、2022 年には神戸製鋼所の子会社である Midrex Technologies, Inc. がスウェーデンの製鉄会社 H2GS AB 向けに、世界初となる 100%水素直接還元鉄プラント商業機を受注<sup>8</sup>する等、商用化が先行し、注目されている<sup>9</sup>。

こうした背景を踏まえ、以下では、水素直接還元製鉄を対象に、輸入水素によって国内で水素直接還元製鉄を行うケースと、国外で製造した水素直接還元鉄を輸入するケースのコストを比較する。

---

<sup>2</sup> 経済産業省 第5回産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ 資料3「製鉄プロセスにおける水素活用」プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性

<sup>3</sup> 日本製鉄 (<https://www.nipponsteel.com/csr/env/warming/future.html>)

<sup>4</sup> Course 50 (<https://www.course50.com/technology/technology01/>)

<sup>5</sup> 水素直接還元は、高炉水素還元と同じく吸熱反応であることから水素の加熱が必要であることや、反応において原料鉄鉱石の粉化や固着が起りやすい等の技術的課題がある。後者の課題回避のために全流通量の約 1 割に過ぎない高品位鉄鉱石が用いられるが、低品位鉄鉱石も利用できる技術開発が求められる。また、水素直接還元によって生産される固体の直接還元鉄には鉄鉱石中の脈石等が含まれる。従って、直接還元鉄を高炉や電炉に投入し熔融することで、これらの成分の分離を行う必要がある。

<sup>6</sup> 神戸製鋼所 (<https://www.kobelco.co.jp/products/ironunit/dri/>)

<sup>7</sup> 神戸製鋼所 ([https://www.kobelco.co.jp/releases/1201993\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1201993_15541.html))

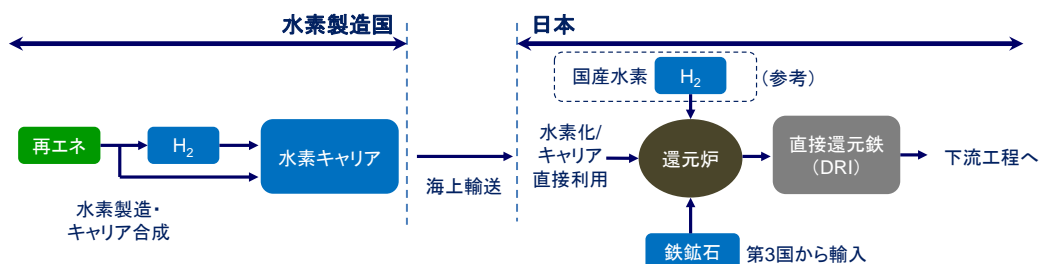
<sup>8</sup> 神戸製鋼所, Midrex Technologies, Inc. ([https://www.kobelco.co.jp/releases/1210984\\_15541.html](https://www.kobelco.co.jp/releases/1210984_15541.html))

<sup>9</sup> 神戸製鋼所 ([https://www.kobelco.co.jp/notices/files/20230317\\_2\\_01.pdf](https://www.kobelco.co.jp/notices/files/20230317_2_01.pdf))

## ケース設定

二つのケースを図1に示す。輸入水素を利用して国内で直接還元製鉄を行うケース（水素輸入ケース：図1上）では、水素の輸入形態として、液化水素（LH）、メチルシクロヘキサン（MCH）、アンモニア（NH<sub>3</sub>）、合成メタン（CH<sub>4</sub>）の各水素キャリアを検討する。液化水素、メチルシクロヘキサン、アンモニアの場合は、日本への輸入後に、それぞれガス化、脱水素、分解によって得られる水素ガスを還元炉に投入し、直接還元鉄（DRI：Direct Reduced Iron）を製造する。一方、合成メタンの場合は、前述の通り天然ガス直接還元製鉄法は商用化されていることから、水素に変換せずに合成メタンを還元炉に投入する。アンモニア直接還元製鉄法についても可能性はあるが<sup>10</sup>、反応機構等の技術仕様や設備費の詳細が不明なため本分析の対象としない。なお、国産水素を利用するケース（水素国産ケース）は参考として検討する。鉄鉱石は日本が輸入する。

### 水素輸入ケース：国内で直接還元製鉄



### 直接還元鉄輸入ケース：水素製造国で直接還元製鉄

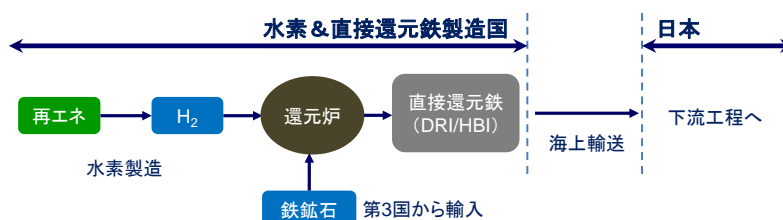


図1 水素輸入ケースと直接還元鉄輸入ケースのサプライチェーン

注：図には表記していないが、水（水電解水素製造用）やCO<sub>2</sub>（メタネーションの場合）も必要となる。  
 注：水素輸入ケースにおいて水素キャリアが合成メタンの場合はメタン直接還元製鉄を行う。  
 注：直接還元鉄輸入ケースにおいては、DRIを圧縮成形によって変換したHBIを海上輸送する。  
 注：国産水素は参考とする。

これに対して、国外で直接還元製鉄を行うケース（直接還元鉄輸入ケース：図1下）では、水素製造国での製鉄を想定する。水素はガスのまま還元炉に投入され、製造されるDRIをHBI（Hot Briquetted Iron）に変換し、日本へ輸出する。鉄鉱石は直接還元製鉄を行う国（＝

<sup>10</sup> 経済産業省 第5回産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ 資料3（p.23）及び参考資料2

水素製造国) が輸入する。製造工程で DRI に生じる多くの気孔は酸素と結合して発熱・発火しやすく、安全性の観点から DRI の長期貯蔵や海上輸送には制約があるが<sup>11</sup>、DRI の圧縮成形により気孔を減らした HBI は海上輸送が可能であり世界的に取引されている<sup>12,13,14</sup>。

本分析では、直接還元製鉄の後に必要となる電炉等の下流工程を捨象しており製鉄フローの全体像を正確に模擬できていないというモデル設定上の課題はあるものの、議論の単純化のため、直接還元鉄を目的生産物と想定し、ケースを設定している。

なお、輸入水素キャリアの一つである合成メタンの製造には、既往技術に加え革新技術があり<sup>15</sup>、後者は再エネ電力を用いて水と CO<sub>2</sub> から直接メタンを合成するプロセスであることから、プロセスへの水素の投入はない。したがって、水素キャリア間及びケース間の同条件での比較のため、インプットは再エネで統一している。表 1 に各ケースにおける直接還元製鉄の還元剤を整理する。

表 1 各ケースにおける直接還元製鉄の還元剤

ケース	水素キャリア	➡	還元剤
水素輸入ケース	輸入液化水素	ガス化	水素
	輸入メチルシクロヘキサン	脱水素	水素
	輸入アンモニア	分解	水素
	輸入合成メタン	—	メタン
	(国産水素ガス) : 参考	—	(水素)
直接還元鉄輸入ケース	国外水素ガス	—	水素

注：アンモニアは水素に分解せずに、アンモニア直接還元製鉄の可能性もあるが、技術仕様が不明のため対象としていない。

## 前提条件

輸入水素キャリアのコスト (水素ガスへの変換プロセスまでを含めた日本到着価格) については既往研究[1]を、直接還元製鉄法の技術仕様や設備費については既往研究[2]を参照する。[1]の水素輸入規模は約 29 億 Nm<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>/年、[2]で想定されている直接還元鉄生産規模に基づく水素消費規模は約 20 億 Nm<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>/年と若干異なるが、スケールファクターによる調整は行わない。また、直接還元製鉄の設備費についてはロケーションファクターを考慮しない。なお、国内水素荷揚港と還元炉、国外水素製造場所と還元炉は隣接していると想定し、水素輸送設備は無視する。

<sup>11</sup> 一部の DRI については、海上輸送するためには安全性確保のため窒素等の不活性ガスによる封入 (イナーテイング) が必要である (<https://www.piclub.or.jp/ja/news/10789>)。

<sup>12</sup> Vincent CHEVRIER, Lauren LORRAINE, Haruyasu MICHISHITA, “ミドレックスプロセス—その進化と脱炭素製鉄への展望—”, 神戸製鋼技報/Vol. 70 No. 1 (Jul. 2020)

<sup>13</sup> 厚雅章, 上村宏, 坂口尚志, “MIDREX®プロセス”, 神戸製鋼技報/Vol. 60 No. 1 (Apr. 2010)

<sup>14</sup> 日本機械学会誌 (<https://www.jsme.or.jp/kaisi/1239-36/>)

<sup>15</sup> 東京ガス (<https://www.tokyo-gas.co.jp/news/press/20221220-02.html>)

表2に各ケースにおける水素のコストを示す。国外で製造される20円/Nm<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>の水素が、キャリア合成・国際輸送を経て日本到着時には1.5～2.5倍になっている。その他の前提条件は付録に示す。

表2 各ケースにおける水素の調達コスト

ケース	水素キャリア	調達コスト
水素輸入ケース	輸入液化水素（ガス化）	53 円/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>
	輸入メチルシクロヘキサン（脱水素）	40 円/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>
	輸入アンモニア（分解）	45 円/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>
	輸入合成メタン	32～38 円/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>
	（国産水素ガス）：参考	（42 円/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub> ）
直接還元鉄輸入ケース	国外水素ガス	20 円/Nm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub>

出所：[1]及び[1]に記載の参考文献に基づき推計。合成メタンは107～126円/Nm<sup>3</sup>-CH<sub>4</sub>の水素熱量換算。数値の幅は革新技術～既往技術を意味する。

## 試算結果

図2に試算結果を示す。全体として、DRIのコストの内、固定費は非常に小さく、変動費が大半を占める。変動費の中では、鉄鉱石のコストが大部分を占める“その他”は、全てのケースにおいて大きな差は見られない。

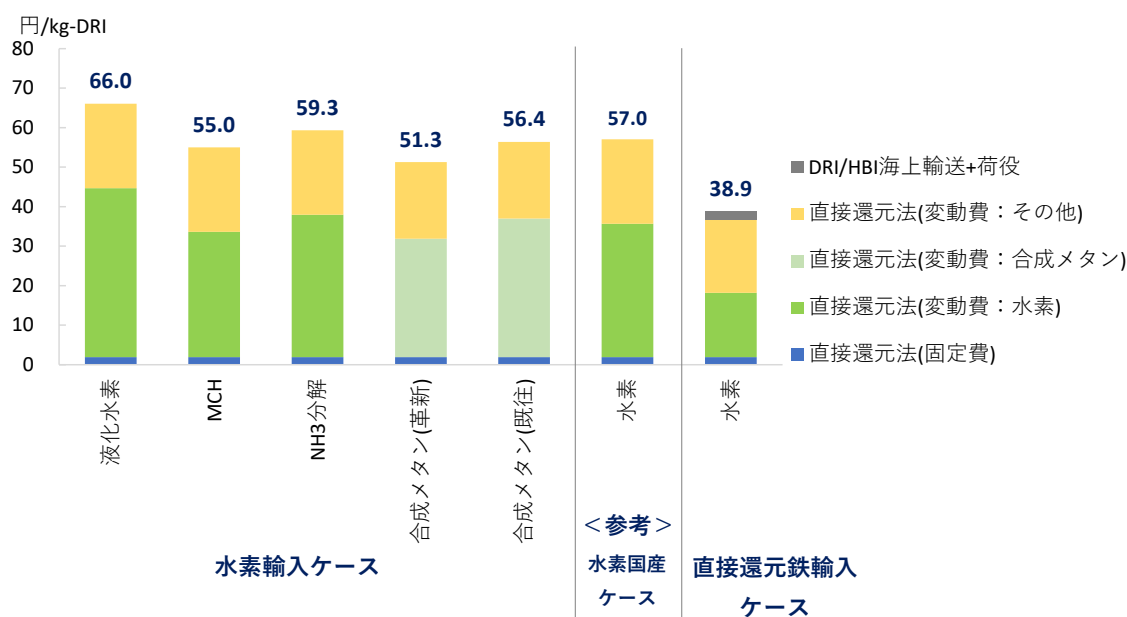


図2 直接還元鉄の調達コスト比較

注：水素直接還元鉄とメタン直接還元鉄の組成は若干異なることに留意が必要。

注：「変動費：その他」には鉄鉱石の輸入コストや還元炉における電力等のエネルギー費用が含まれるが、鉄鉱石の輸入コストが大半を占める。

顕著な差が見られるのは変動費の水素または合成メタンである。表2で示したように、水素輸入ケースにおいて、水素のコストは液化水素、アンモニア（分解）、合成メタン（既往

技術)、MCH、合成メタン(革新技術)の順に安価となっていることから、直接還元鉄調達コストも同様の順になっている。これに対して、直接還元鉄輸入ケースが最も安価である。これは、水素キャリアへの変換・輸送コストがDRI/HBIの輸送コストよりも大幅に高いことを意味する。なお、参考として示した国産水素で直接還元製鉄を行うケース(水素国産ケース)と、水素輸入ケースとの間には大きな差は見られない。

## 考察

直接還元鉄輸入ケースのコスト(直接還元鉄の日本への供給コスト)が水素輸入ケースのそれよりも安価であるという試算結果は、単に国外の水素製造コストが安価であっても、水素キャリアへの変換・輸送によって大幅なコスト増になるという自明な点を示したに過ぎないとも言えよう。しかしながら、本試算結果が提起することは、水素キャリア輸入コストの高低にのみフォーカスした議論ではなく、輸入水素を利用して国内で製品を製造することの経済性をどう考えるべきかという論点である。

我が国はエネルギー・資源・製品の多くを輸入しており、国富流出抑制の観点から輸入コストを最小化する努力が求められる。水素を利用して製造される製品は、直接還元鉄以外にも例えば化学品等、数多くあり、本分析結果を一概に当てはめることはできない。しかしながら、いずれにせよ輸入を避けられないならば、物理的に輸送が非常に困難な水素の輸入に固執せず、国外で水素を利用して製造した製品を我が国に輸入するというオプションも検討すべきかもしれない。その場合は、個別の製品ごとに産業やサプライチェーンの状況に即した検討が極めて重要になる。

なお、今回の分析で事例として扱った直接還元鉄は、いわば「中間製品」であることにも留意する必要がある。「中間製品」である直接還元鉄の輸入を活用して、最終製品の製造に必要な高炉や電炉等の工程やそこからの下流のサプライチェーンを国内に残すなど、産業空洞化を最小限に留めるサプライチェーン全体としての最適化に向けた検討も重要になるろう。

一方、国産水素利用ケースは参考として扱ったに過ぎないが、別の見方をすると、産業空洞化を避けるために国内での製品製造を選択する場合、国産水素コストが輸入水素コストと同水準であれば、少なくとも国富流出を抑制できる国産水素の可能性を深堀する意義がある。ただし、その場合においても、コスト抑制の観点から、水素キャリアへの変換・輸送を最小限にとどめる必要がある。そのためには、近年データセンターの北海道への立地が進んでいる例<sup>16</sup>が示すように、再エネが豊富で相対的に安価な地域への産業移転も検討する価

---

<sup>16</sup> [https://www.pref.hokkaido.lg.jp/kz/ssg/sgr/dc\\_guide.html](https://www.pref.hokkaido.lg.jp/kz/ssg/sgr/dc_guide.html)

値がある。そうすることで、需要拡大による再エネ普及拡大にも貢献できる。

元来、水素は水素キャリアに変換せずにガスのまま製造地近傍で利用することが効率的であるという原理からは逃れられない。用途によっては、水素輸入を所与とせずに、経済や産業への影響を踏まえた多角的な視点に基づく議論が求められる。



## 参考文献

[1] 大槻, 柴田, “合成メタン等の製造・供給費用試算”, 第9回メタネーション推進官民協議会, 2022年11月22日

[2] “水素直接還元製鉄法の評価と技術課題”, 低炭素社会戦略センター, 令和4年5月

## 付録（試算のための想定）

### 直接還元製鉄

		国内で直接還元製鉄		国外で	
		水素	メタン	水素直接還元製鉄	
設備規模		250万 t-DRI/年			
固定費	設備費	285億円			
	年経費率	15%			
	人工	100人			
	労務費	500万円/人			
変動費	原単位	鉄鉱石	1,417kg/t-DRI		
		水素	800 Nm <sup>3</sup> /t-DRI	—	800 Nm <sup>3</sup> /t-DRI
		天然ガス	50 Nm <sup>3</sup> /t-DRI	279 Nm <sup>3</sup> /t-DRI	50 Nm <sup>3</sup> /t-DRI
		動力	135 kWh/t-DRI		
	単価	鉄鉱石	12,000 円/t		
		水素	40~53 円/Nm <sup>3</sup> *1	—	20 円/Nm <sup>3</sup> *1
		天然ガス	1.1 円/MJ	3.0~3.5 円 MJ*1,2	0.4 円/MJ
		動力	17.9 円/kWh		6.2 円/kWh

出所：文献[1]、[2]及びこれらの文献に記載の出典から想定・推定。

注：天然ガスは DRI 中の炭素含有率を高めるために利用。

※1：本文中の表 2 参照。

※2：輸入合成メタンの価格。

### 直接還元鉄の海上輸送等

載貨重量（バルカーの Cape size）	15 万 t	「世界の造船市場と我が国造船業の動向」（令和 4 年 7 月国土交通省海事局船舶産業課）を参考に想定
船価	5,000 万ドル/隻	
Loading/unloading 設備	10 億円	各種資料

注：航海距離は[1]に基づき 12,000km を想定。船速や荷積み・荷下ろし日数を想定し、年間輸送 DRI/HBI 量から必要隻数を推計。“The Future of Hydrogen”(IEA 2019)の LH2、MCH、NH3 の載貨重量と燃費の関係に基づき Cape size バルカーの燃費（MJ/km）を推計。また、船舶燃料はグリーンアンモニアを想定し、価格は[1]に基づき推計。