

特別講演

□渡辺義介賞受賞記念

鉄鋼技術から環境対応への発信

Some Messages to Environmentally Friendly Society from Science and Technology of Iron & Steel Industry

大橋徹郎

Tetsuro Ohashi

独立行政法人交通安全環境研究所 理事長



* 脚注に略歴

1 はじめに

21世紀は「環境の世紀」とも言われている。有限な資源と化石エネルギーの膨大な消費によって築かれた20世紀型の「豊かな社会」構築の価値観は、地球環境問題とも相まって「再生可能エネルギー創成と持続的社會実現」に向けて大幅な転換を余儀なくされている。鉄鋼業は資源とエネルギーの多消費で成り立つ代表的産業ではあるが、それによって得た良質で安価な鉄鋼材料や加工製品によって高度産業社会の基盤を支えているという評価と自負心のみでは、その社会的存在価値は不安定と言わざるを得ない。むしろ長年蓄積された鉄鋼技術を糧に、「環境貢献型」の産業としても積極的に提案・実行することによって21世紀に相応しい産業に脱皮しうるのはなかろうか。

以下に鉄鋼技術の環境対応への関わりに焦点をあて、過去の事例の考察とともに、将来のクリーンエネルギー創成への貢献の可能性について述べる。いささかながらも読者諸兄への参考となれば幸甚である。

2 革新的省エネ技術／連続鋳造

筆者の40年近い鉄鋼業との関わりの中で、最も長く従事したのは製鋼分野、中でも「連続鋳造」技術とその開発であった。わが国において鋼の連続鋳造が工業的にスタートしたのは1950年代の半ばであった。当初は小断面のビレット、ブルーム鋳造から開始し、60年代の後半になって大断面スラブへの適用が進み、70年代に一挙に発展拡大して、80年代後半には連続化率は90%を越えるレベルにまで到達した。純酸素上吹き転炉法と並んでわが国鉄鋼業発展の原動力となり、高い国際競争力の基になったということは良く知られて

いるところである。

この間の粗鋼生産量と連続鋳造化率の推移を図1に示す¹⁾。連続鋳造技術が短期間に拡大発展した理由として、従来のインゴット法と比較して大幅な工程省略による省力化や歩留り向上が実現可能で、加えて凝固の形態から品質の均一性を高め得ること等が挙げられているが、これらは現在の価値からは全て省エネルギーの実現として評価することも出来る。ちなみに1970年時点と2000年時点との粗鋼生産・連続鋳造比率から、歩留りの向上や中間工程（分塊圧延）の省略等によるエネルギー消費量の差を粗く試算すると²⁾、連続鋳造によってもたらされた省エネルギー効果は、何と年間100Pcal（ペタカロリー；10の15乗カロリー）となり、粗鋼トン当たりでは100万kcalの省エネルギー量に相当する。この省エネルギー効果は、原油換算でわが国の年間エネルギー最終需要量の約3%にも匹敵する膨大なものとなるとともに、それに相応する量の炭酸ガス削減にも貢献していることとなる。勿論、これは数十年の過去の積み重ねを一瞬に置換した効果評価にすぎないが、技術の総合評価の一つの尺度と考えること

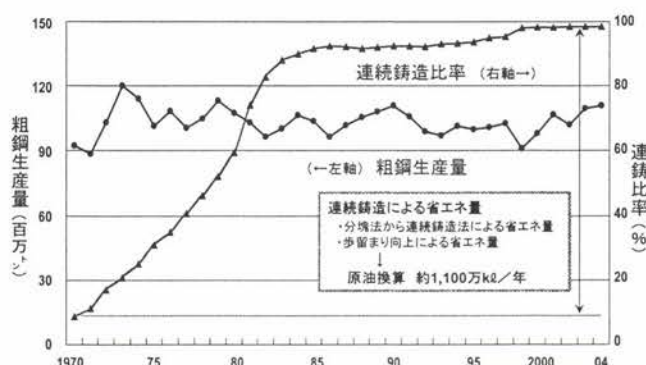


図1 粗鋼生産量と連続鋳造比率の推移¹⁾

* 昭和37年阪大工学部冶金学科卒業後直ちに富士製鉄(株)に入社。広畑製鉄所研究所、同製鋼部、中研本部研究企画部部長、技術開発本部技術開発企画部長等を経て、平成5年取締役・技開本部副本部長、鉄鋼研究所長、9年常務取締役名古屋製鉄所長、13年代表取締役副社長・技術開発本部長を歴任、15年4月から現職。14、15年度に本会副会長。

ができる。このように連続鑄造技術一つを取り上げても、鉄鋼技術は効果的な省エネ技術として大いに貢献してきたと言え、今後も鉄鋼の総合技術力で更なる省エネを含めた環境対応への貢献が可能であるとのメッセージにもなる。

さて、連続鑄造技術がこのような膨大な省エネ効果を発揮し得たのは、20年程度の短期間になされた数多くの技術改善・開発によって、生産性を飛躍的に向上させると共に品質安定と高級鋼化を実現させたことにある。この間の技術進歩を主として新日本製鐵の各種技術指標の変化で見ると図2に示すようになる。高速鑄造化や連連鑄化等によってほぼ3倍の生産性向上、品質の改善と安定化等によって5倍以上の品種適用率の拡大を達成している。当然ながらこの実現は数多くの研究開発成果、特に凝固現象や材料・機械力学さらには流体力学等の基礎的解析と現象理解をベースとした多くの要素技術開発に基づいてなされたものである。その主要な幾つかの技術群として、「センサーと制御技術」、「耐火物と雰囲気制御」、「部分加熱技術と温度制御」、「鋼の高温物性と応力・変形制御」、「核生成・初期凝固現象解析と凝固組織制御」および「電磁力利用と流動制御」などを挙げることができる。この中で筆者が多少なりとも関わった「凝固現象と制御技術」に関して次章にてやや詳しく触れてみたい。

3 連続鑄造発展の原動力／凝固現象と制御技術

大部分の鉄鋼材料は「液体」から「固体」への相変態を経て、加工工程へ移される。概して物質の質改善や新機能付与等は、大きな反応や相変化時の制御で実現されるケースが往々にしてある。この意味からも、「液体」から「固体」への変化、即ち「凝固」過程は、鉄鋼の質制御に最も適した場であると言える。上述したように連続鑄造が比較的短期間に生産性向上と高級鋼化を達成して、膨大な省エネ効果を発揮し得たことに繋がったのも、その「生まれ」の瞬間の「凝固時の現象理解と制御」に負うところが大きい。

		1975年	2000年
生産性	(大型スラブ用 万トン／月・ストランド)	3	7
	良鑄片歩留り (薄板用アルミキルト %)	85	~97
	高速化 (m／分)	0.7	2.0
	連々鑄 (ch／cast)	3	12
高品質化	対象品種	~10品種	全品種
	直行率 (%)	10	80
	非金属介在物量 (スライム抽出 mg／10kg)	100	1~4

図2 連続鑄造技術の発展の指標

さて、ここで言う「凝固現象」とは結晶組織形態、偏析、析出物分布等を広く指すものであって、後工程での加熱、圧延、冷却等との組み合わせによって鋼材の材料特性を多様に变化させ得る要素となる。強度、靱性等の材料の機械的性質は材料内の微視的構造に敏感に依存するため、鋼材の平均的な状態のみでなく、局所的な状態に左右されることが多い。この局所的な不均一性の起源の多くが凝固過程にあり、しかもその不均一性を後工程で解消することは容易ではないので、凝固時の制御が大切となる。その凝固時の制御の主要な手段として「核生成制御」と「電磁力利用による溶鋼流動制御」を挙げることができる。

凝固組織形成の初期過程は「核生成と結晶成長」である。特に「核生成」に関しては、その現象理解が進めば、最も制御に適した場となり得ると考えられるが、この現象はナノスケールで起こるものであることから、未だにその全容の詳細は解明されていない。著者らは過冷却状態にある溶鉄中に各種析出物を浮遊させ、その時の臨界過冷却度の変化から鉄の結晶化に有利な析出物を選択評価し³⁾、酸化物系では希土類元素 (REM) が有効で、実験によっても凝固組織微細化効果がある事を確認したが⁴⁾、残念ながら安定的な再現性を得られてはいない。核生成現象の理論的解析も相当に進歩はしているものの、依然としてTurnbullらの古典的理論⁵⁾の域を大きく越えるものではなく、実現象との間に相当の乖離があると思われる。今後、核生成制御は、固相変態時の不均質核生成現象を応用した「オキサイドメタラジー」の発展も含め⁶⁾、将来の鉄鋼材料の品質や材質制御の有力手法として期待できるものであり、その追求は更なる省エネルギーの手段にも繋がり得るものと考えている。

さて、次の制御手段としての「電磁力利用による溶鋼流動制御」については、最近の発展拡大には目覚ましいものがあり、ほぼ全ての連続鑄造機には何らかの電磁力利用設備が具備されていると言っても過言では無い。その応用も図3に示

部 位	用 途	~1970年代	1980年代	1990年代	2000年代
タンディシュ	加熱		誘導加熱	誘導加熱、プラズマ加熱	
	ブレーキ 攪拌			直流ダム	遠心力
ノズル	加熱		誘導加熱		
	流動制御 ブレーキ		リニアモーター	ロータリー	
モールド	攪拌	モールド内電磁攪拌			
	ブレーキ		バルブ流動制御		
	加熱		電磁ブレーキ		
	形状		メイスカスフリー鑄造		
ストランド	攪拌	電磁鑄造 (高／低周波)			
	ブレーキ	偏析制御		介在物制御	

(実線は現場適用技術、〃は研究段階を示す)

図3 電磁流体力学技術の連続鑄造への応用

すように加熱から流動制御までの多岐に亘ってきている。特に応用が盛んなのは、直流磁界を用いた電磁ブレーキと交流磁界を用いた電磁攪拌である。前者は鋳型内や鋳型直下に設置され、非金属介在物のノズル流に沿っての浸透抑制に利用される。後者は凝固の中、末期に設置されて凝固組織微細化や偏析分散に効果を発揮しているものと、鋳型内に設置されて初期凝固殻の均一化やパウダー流入防止、さらには非金属介在物の浮上加速の手段としても効果を発揮しているものが挙げられる。この鋳型内電磁攪拌技術に関しては、筆者らが当初「弱脱酸鋼」の製造を目的として開発⁷⁾してきたものであり、本来目的は未達成ながらも、上述の各種目的に利用され発展している。将来、高温超伝導材料の実用化等によって、更に高い性能の磁場が実現されれば、応用範囲が広がり、更なる省エネルギーに資する可能性も大と思われる。

以上、連続鋳造技術の発展とそれを支えた二、三の要素技術を例に挙げ、革新的な鉄鋼技術が省資源、省エネルギーを通じた環境対応技術でもあったことを述べた。鉄鋼業にはこの他にも大型高炉、転炉製鋼法、連続焼鈍技術等多くの省エネルギー・環境対応技術がある事も付言させていただく。

4 鉄鋼環境技術のポテンシャル

前章までに過去から現在に至る鉄鋼技術の幾つかが優れた「環境対応技術」でもあった事例を述べたが、現在及び将来に向けてこの方向が益々強まり、さらに積極的に社会との共存を目指し、「環境に優しい循環型社会」の地域中核としての役割を果たそうとしていることに話題を移す。これに関しては既に鉄鋼協会から「鉄鋼環境技術の将来展望」と題する報告書⁸⁾が発行されており、製鉄所を核にした「エコ・コンビナート」構想が提案され、しかもその幾つかは既に実現しつつある。鉄鋼業とその技術が多大な環境対応ポテンシャルを有していることはこの報告書にも詳細に述べられており、中でも重点環境対応技術として、例えば鉄鋼商品を通じての

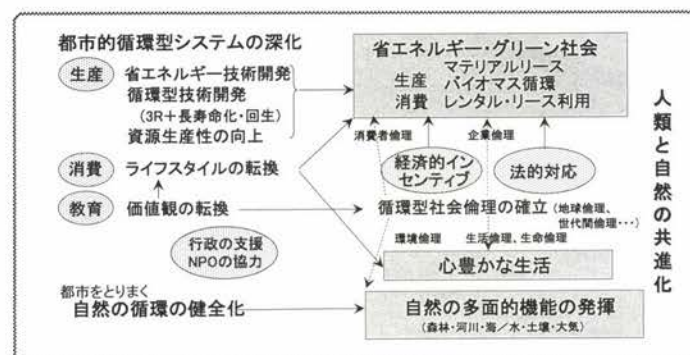
「エコプロダクト」は言うに及ばず、「廃プラ、廃タイヤ等の産業間資源循環」、「炭酸ガス削減、分離、固定化」等が挙げられている。この中でも、筆者は個人的には「クリーンエネルギーの創成と供給」に深い興味を持っている。

鉄鋼技術のキー・テクノロジーの一つが酸化・還元反応であるが、これは換言するとエネルギー利用・転換技術でもある。しかも高温下、広範囲の圧力下で、大量に物質を移動させ処理する基盤技術とそのインフラも具備している。今後、社会が要請する「再生可能でクリーンなエネルギー」の創成と供給基地としての鉄鋼の役割も十分期待できる所以である。この事例としては既に各種副生ガスからの発電や燃料ガスの供給等が挙げられるが、今後は燃料電池等への供給も視野に入れた「水素供給ポテンシャル」としての期待も大きい。これに関し、更に次章で述べる。

5 再生可能性と持続性／水素エネルギー社会への貢献

「環境問題」は「エネルギー問題」であり、それは「化石燃料資源の枯渇」と「炭酸ガスによる地球温暖化」によって規定され、21世紀中に確実に直面する最大課題と言える。この問題の解決は、「循環型社会の構築」と「エネルギーの質的転換」の可否に大きく依存する。日本学術会議は「循環型社会の構築」に関して、資源・エネルギーを「リースとレンタル」の視点から捉え、価値観とライフスタイルの転換を含めた新たな社会システムとして提言している。その概要を図4に示す⁹⁾。前述の鉄鋼の「エコ・コンビナート」構想もこのコンセプトとの共通項として理解される。

さて、京都議定書の発効により、我々は炭酸ガス排出削減に大きな責務を負うが、その実現は危ぶまれている。産業における炭酸ガス排出量は1990年対比にて2000年のレベルにおいてもほぼ横ばいであるのに比べ、民生と運輸部門の炭酸ガス排出量は大幅に増加し続けており、特に運輸分野は



真の循環型社会を構築するためには、省エネルギー・循環型の技術開発を進めることによって現代の都市社会をマテリアル・リース、バイオマス循環、レンタル・リース利用等を骨格とした「省エネルギー・グリーン社会」に換えていく必要がある。そのためには経済的インセンティブを与えることが重要であり、法的対応も必要になる。一方で、「息の長い」教育により価値観の転換を図り、ライフスタイルを変えていかねばならない。さらに、循環型社会倫理ともいべきものを確立し、「心豊かな生活」を尊ぶ社会を目指さなければならない。私たちの生活を取りまく自然の循環を健全なものにし、自然の多面的機能が十分に発揮される環境を取り戻すことも大切である。

図4 真の循環型社会を求めて⁹⁾

20%強も増加している。一つの試算として、炭酸ガスが無対策にて増加してゆく「破局ケース」に対して、各種の対策技術によって2100年時点で正味炭酸ガス排出量を2000年レベル以下に抑制し得るという「再生ケース」を描き得るという提言がある¹⁰⁾。その対策技術の主体は「省エネルギー」と「炭酸ガス固定と貯留」および「バイオマス等の再生可能なクリーンエネルギー創成」である。

5.1 水素燃料電池自動車

現在、先進国が排出する炭酸ガスの3割が自動車起因と言われており、21世紀の環境とエネルギーに関する最大の課題の一つは、増え続ける自動車用のエネルギーをどのように提供するか、という問題に帰結され、「再生可能でクリーン」な新しいエネルギー源への移行は必至だと言われている。ここでは筆者も多少は関わっている燃料電池車と水素燃料について述べてみたいと思う。

エネルギー資源転換の過去の経緯と今後の超長期的な将来に向けての見通しの1ケースとして図5に示すトレンドが提案されている¹¹⁾。産業革命はモビリティ社会を生み出し、先ず鉄道が登場した。このための燃料としての最初の化石資源が固体としての石炭であったが、ロンドンに煤にまみれ、喘息患者が急増したと言われている。次いで自動車の発展に歩を合わせ、石炭から石油への液体燃料転換が進み、船舶や航空機の増加等によってもその使用量は飛躍的に増大した。石炭時代の煤の問題は軽減されたが、炭酸ガスによる地球温暖化問題が浮上してきた。今後はより炭酸ガス排出や有害物質排出の少ない化石ガス燃料が主流となり、やがては炭酸ガスフリーな新エネルギー源として「水素」社会が到来するとの期待が大きい。

水素は水との循環を考えると、まさに再生可能でクリーンなエネルギーといえる。更にその他の特徴としても、「多様な原料/資源ソース」「貯蔵可能なエネルギー」「電気や熱と

の互換性」等が挙げられ、自動車用の燃料電池や家庭用定置型発電や各種のバッテリー等への応用、さらには水素内燃機関への適用等の幅広い利用が期待される。これらが、21世紀は水素エネルギーの世紀とも呼ばれる所以である。

トヨタ自動車の試算による自動車各種燃料方式の総炭酸ガス排出量の比較を図6に示す^{12, 13)}。それぞれ「well to tank」と「tank to wheel」の積算となる。エネルギー効率も含めた総合評価として、燃料電池が極めて優位で、「tank to wheel」時の排出は0、「well to tank」時の排出は水素の生産方式にて左右されるが、かなり低位であり、化石燃料ソース以外の水素製造で限りなく0に近づくことになる。

さて、燃料電池車は、わが国においては世界に先駆けて既に乗用車やバス等にて試験走行が進められており、水素供給インフラの試用もなされ、間もなく一般に製造販売されるステージを迎えようとしている。国の計画によると2030年には燃料電池車が1500万台に達し、所要水素は年間150万トン程度になると想定され、それに向けての多様で総合的な開発や法制度含めた社会インフラの整備も急速に現実味を帯びてきている。しかしながら、この実現には超えねばならない数々の困難な課題も想起されている。例えば、低価格化、耐久性、低温起動性や航続距離向上等であり、その幾つかは材料開発等に依存するものもあって鉄鋼技術の適用も期待されているが、ここでは特に自動車以外も含め社会全体に大きな影響を与える水素製造に関して触れてみたい。

5.2 水素製造/供給と鉄鋼技術

水素の製造方法と貯蔵、輸送方法等に関しては、環境と安全性配慮の下での低コスト製造方法と安定供給が求められるが、これは逆にエネルギー小国の日本にとっては又とないエネルギー創成国へ飛躍しうるチャンスとなるかも知れない。現在提案されている水素製造方法の概要を図7に示す¹⁴⁾。過渡的な普及段階では化石燃料ベースの水素製造(改質)が主

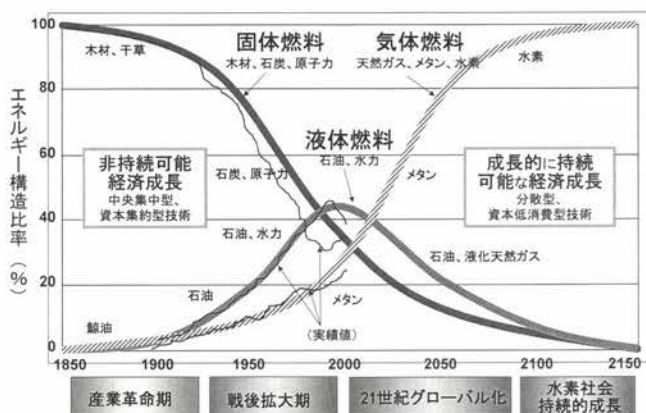


図5 エネルギー構造の変遷¹¹⁾

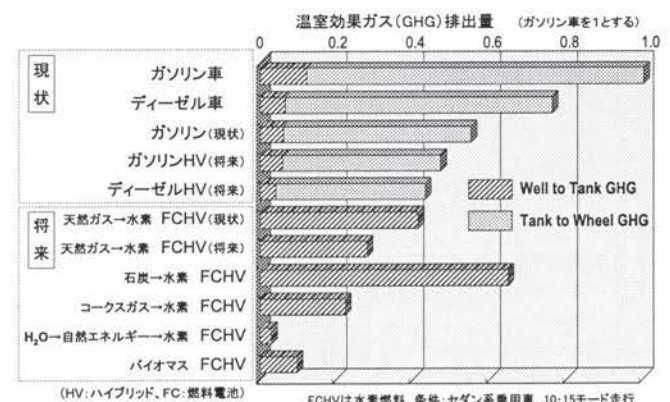


図6 自動車走行による温室効果ガス排出量^{12, 13)}

とならざるを得ないが、この場合も副産物として生成される製鉄ガスからの分離分解による水素は、炭酸ガスフリーとも考えられ最有力候補ではなかろうか。製鉄ガスからの水素製造に関し、JRCMにて実行中の国家プロジェクトの概要を図8に示す¹⁵⁾。水素供給ポテンシャルは全国の製鉄所総計では45億Nm³/年と推定され、約500万台/年の燃料電池車に供給し得ると見積もられている。

しかしながら、将来水素の需要が高まる程に、全く炭酸ガスを排出しないクリーンな製造方法へ転換せざるを得ないと考えられる。自然エネルギーや原子力による熱化学分解、もしくは電気分解も考えられるが、製造の容易さや量の豊富さや安全性、経済性をも含めた場合、「バイオマス」による水素製造が極めて魅力的と考えられる。

現在地球上で光合成による炭素年間生産量はエネルギー換算にして3000EJ (エクサジュール; 10¹⁸乗ジュール) と見積もられ、年間の化石資源総炭素消費量300EJの何と10倍もの量が生成されていると言われている¹⁶⁾。勿論、その全てがエネルギーに転換しうる訳では無いが、エネルギー転換に提供可能な廃棄物系のみでも100EJ程度とされ、化石燃

料消費の1/3を補償しうる量と計算され、日本においても全エネルギー供給量の10～15%を補う潜在力を持っているとされている。バイオマスの種類と量、そこからのエネルギー変換方法の一覧を図9に示す^{17, 18)}。現在一般的なのは、植物油からのエステル化による「バイオディーゼル燃料」や、微生物発酵を利用した「エタノール」や「メタン」生成が主であるが、更なる生産性向上やコスト削減のための新分解生成技術として、各種熱化学的方法や超臨界流体利用法等も開発の途上にある。昨年の本会の西山賞受賞者の徳田昌則博士も、奇しくも記念講演にて、新技術にての高生産性バイオマス分解技術を推奨されており¹⁹⁾、意を強くする次第である。

いずれにしても、「カーボンニュートラル」なバイオマスベースの液体又はガス燃料、およびそれらからの最終的な水素の製造が魅力的であり、その実現には高温高压かつ三相(気、液、固体)での大量処理技術やそれに最適な材料開発も必要となり、まさに鉄鋼技術の応用こそが期待されるのではなかろうか。将来の鉄鋼業は循環型社会の核として、地域へのクリーンエネルギー供給に貢献し得ると共に、得られたエネルギーを自らのプロセス内で還元剤やクリーン燃料としても活用し得る可能性も秘めている。

6 おわりに

高度成長時代を経て、経済的には「豊かな日本」が実現されたが、それを支えたのは鉄鋼を始めとする「工業化社会」であった。これは反面、意図せざる結果として「農林業」衰退を引き起こし、「食料・エネルギーの自給率低下」を招くことに繋がったとも言えよう。今後、真に豊かな日本を構築してゆくためには、欧米に見られるような農業と工業のバランス、過疎農地や山林の復権、中央と地方の最適化等を目指すべきではなかろうか。

今回、「鉄鋼技術からの将来の環境/エネルギー対応」とし

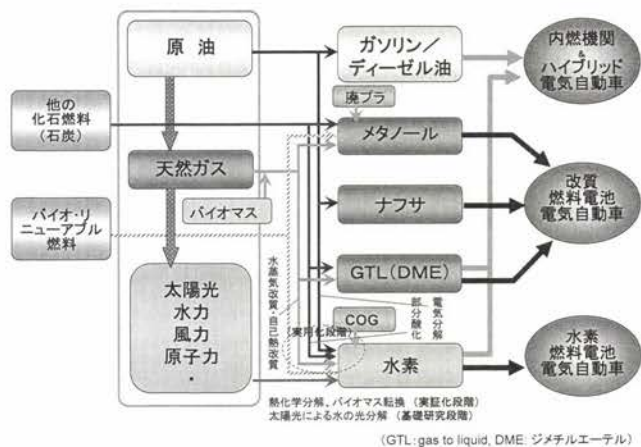


図7 水素燃料の製造ルート¹⁴⁾

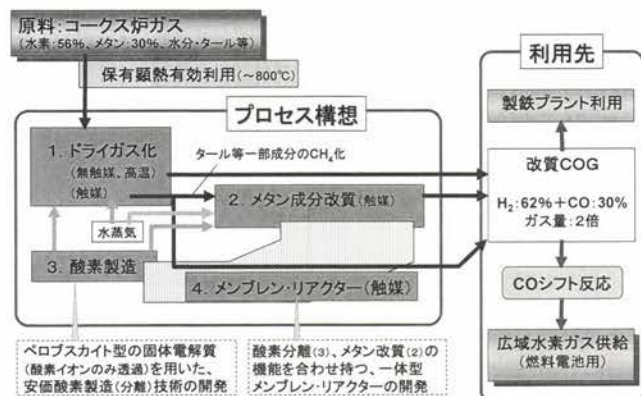


図8 COGからの水素製造プロセス構想¹⁵⁾

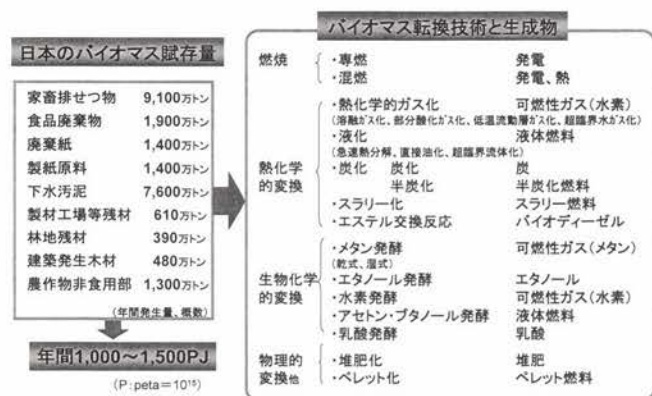


図9 バイオマスの利活用^{17, 18)}

て、特に「バイオマス利用水素エネルギー」の可能性について述べたが、この技術が持つもう一つの重要な側面として、これによって「農業」が「新しいエネルギー産業」の一面をも併せ持つことに繋がるのではとの期待もある。日本が世界に誇る鉄鋼技術とともに「豊かで良質な緑(土)と水」がさらにこれを可能にするのではないだろうか。

20世紀後半に高度成長下の経済発展を支えた鉄鋼業は、成熟型の「重厚長大産業」との印象を持たれているが、21世紀には「産業基盤を支える鉄鋼供給」の役割に加え、「持続的社會を支える環境対応基地」としても貢献し、その存在がより確固たるものになるのではなかろうか。

参考文献

- 1) 鉄鋼統計要覧, 日本鉄鋼連盟
- 2) 石原重利: 鋼の連続鑄造技術における最近の進捗, 第40, 41回 西山記念技術講座, (1976), 10.
- 3) 大橋徹郎, 広本 健, 藤井広務, 塗 嘉夫, 浅野鋼一: 鉄と鋼, 62 (1976) 6, 10.
- 4) 塗 嘉夫, 大橋徹郎, 広本 健, 北村 修: 鉄と鋼, 66 (1980) 6, 18.
- 5) J.H. Hollomon and D. Turnbull: Prog. in Met.Phys., 4 (1953), 333.
- 6) J. Takamura and S. Mizoguchi: 6th Int. Iron and Steel Con., Nagoya, Japan, (1990), 591.
- 7) 竹内栄一, 藤井広務, 大橋徹郎, 丹野 仁, 高尾滋良, 古垣一成, 喜多村治雄: 鉄と鋼, 69 (1983) 14, 85.
- 8) 鉄鋼環境技術の将来展望, 日本鉄鋼協会, (2003)
- 9) 真の循環型社會を求めて, 日本学術会議, (2003)
- 10) 茅 陽一監修: CO2削減戦略, 日刊工業新聞社, (2000)
- 11) R.A. Hefner³: The Age of Energy Gases, The GHK Company, (2002)
- 12) T. Kawai: 4th Int. Symp. on Fuel Cell Vehicles, (2004)
- 13) 輸送用燃料のWell-to-Wheel評価, トヨタ自動車株式会社, みずほ情報総研株式会社, (2004)
- 14) Y. Takagi: Int. Workshop on Environmentally Friendly Vehicles, (2004)
- 15) 永浜洋一: 製鉄プロセスガスからの水素製造, 資源エネルギーフォーラム, 秋田大学, (2004)
- 16) 新エネルギー海外情報, 新エネルギー開発機構(NEDO), (2000)
- 17) バイオマス・ニッポン総合戦略, 閣議決定資料, (2002)
- 18) S. Yokoyama: Int. Workshop on Environmentally Friendly Vehicles, (2004), 309.
- 19) 徳田昌則: ふえらむ, 9 (2004), 473.

(2005年4月11日受付)