



産業

産業分野ロードマップ(資料2-3)

産業分野の技術スペックの考え方

①ケース、分野共通の条件

- 資源制約の条件：想定した石油ピーク(2050年)、天然ガスピーク(2100年)までに、他のエネルギー源と互換可能な状態とする
- 環境制約の条件：CO2排出量/GDPを、2050年に1/3、2100年に1/10以下とする

②技術スペック設定の基本的な考え方と連関

- ケースA(石炭等の化石資源とCO2回収・隔離の最大利用ケース)およびケースB(原子力の最大利用ケース)
大規模集約設備ではCO2の回収隔離が、それ以外の施設では電化・水素化が求められる。
- ケースB(原子力の最大利用ケース) 原材料として必要な場合以外は、電気/水素によって製造することが求められる。
- ケースC(再生可能エネルギーの最大利用と究極の省エネルギー実施ケース)
経済発展しながら資源制約、環境制約を克服するためには、効用あたりの必要エネルギー量を70%削減することが求められる。産業分野では、ケースCが技術的に最も厳しいのでこれを中心に、以下のように技術スペックを設定した。
 - 1) 製造プロセスに必要なエネルギーの原単位を50%削減する。ただし、物質に保存されるエネルギーを除く。
 - 2) 製品中に保存されるエネルギーの80%を物質エネルギーとして再生する。
 - 3) 製品価値の総量をGDPに比例して増大させつつも、その効能や機能に必要な物質量を減らす「高機能化」を4倍にする。
 この3つの技術スペックを追求して、産業分野での多様性に対応するとともに、さらなる飛躍ポテンシャルを用意した。

③2100年からバックキャストで技術スペックを設定

2100年からバックキャストして、2050年および2030年の技術スペックを設定した。

④各時点の個別条件を満たすために求められる技術スペック、時期等をロードマップとして整理。

産業	2000	2030	2050	2100
製造量×製品の価値	1倍		1.5倍	2.1倍
必要エネルギー量※	—	25%削減	40%削減	70%削減
1) 製造エネルギー原単位改善	—	20%削減	30%削減	50%削減
2) 物質エネルギー再生率		50%	60%	80%
3) 高機能化(強度等) (機能/物質量)	1倍	2倍	3倍	4倍

※GDPに比例して効用(製造量×製品の価値)が増加した場合を基準として、転換分野からの供給が必要なエネルギー(単位当たり)の削減量

産業分野の技術スペック実現のための技術群の考え方 (1)

産業分野は、資源に乏しい我が国の経済基盤を支えるとともに、各分野における技術シーズを提供する役割を担っている。ここでは我が国の産業が資源制約や環境制約を克服しつつ国際競争力維持向上に寄与する革新的な技術をエネルギー分野から洗い出すことに挑戦した。

産業分野は多様なプロセスで生産活動を行っており、またエネルギー利用形態も様々であるため、エネルギー多消費型の素材系4業種(製鉄、化学、セメント、紙パ)とその他との5つに分けて検討した。その他には、農林水産業、鉱業、建設業などの非製造業、機械、食料品などの工業が含まれる。

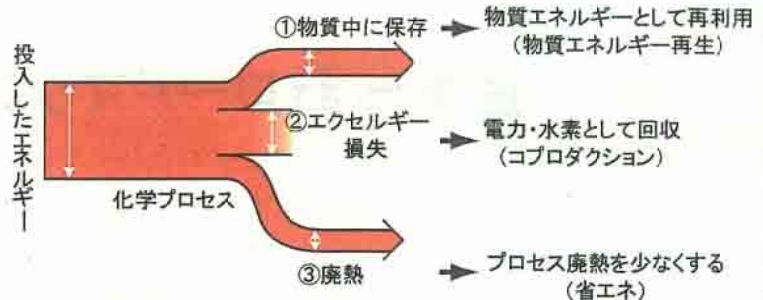
素材系4業種では、(天然)資源から製品を生産するとともにその生産プロセスにおいて多様なエネルギー転換が同時に行われるという特徴を有しつつ、物質生産(物質転換)部門とも認識することができる。

【製造プロセスにおけるエネルギー利用の高度化『うまくつくる』】

素材系の物質生産(物質転換)部門におけるエネルギー

消費構造を右図に示す。投入されたエネルギーは、
①物質中に化学エネルギーとして保存されるもの
②燃焼過程等でエクセルギー損失となるもの
③プロセスでの廃熱

の3つになる。②と③がプロセスで消費したエネルギーであり、これらを削減することにより、必要エネルギー量を削減する。このうち、②を電気や水素として回収するのが、コプロダクション(物質とエネルギーの併産)である。



【物質エネルギーの再生『上手につかう』】

製品(物質)は自らの中に化学エネルギー①を保存しており、製品が社会での使命を終えたあと、このエネルギーを物質あるいはエネルギーとして再生させる。製造時必要とするエネルギーの60%以上を物質として保有している化学品および紙の製造プロセスでは、物質エネルギー再生による改善効果が大きい。さらに、産業間連携にとどまらず、セクターを横断して廃棄物を製造プラントに利用したり、併産した電力や水素などをバウンダリーを越えて利用するなど、クロスバウンダリーの取り組みが重要となる。

【少ない資源での製品製造によるエネルギー削減『良いものをつくる』】

「少ない資源での製品製造によるエネルギー削減」は、「高機能化」を達成するための技術群を列挙しており、わが国の国際競争力の維持拡大のために欠かせないアイテムであるだけでなく、各分野における技術革新のシーズを提供する重要な課題である。

産-2

産業分野の技術スペック実現のための技術群の考え方 (2)

【製鉄】 現在の高炉による生産プロセスは副生ガスや排熱などが高度に回収利用されるなど、極めてエネルギー効率が高い。今世紀前半は既存プロセスの改善更新や次世代プロセスの導入と、廃棄物(廃プラ・廃タイヤ・バイオマス)の活用による一次投入エネルギーの削減が進められると考えられる。また、再生可能エネルギーを利用した水素供給が可能となるまでの間、副生水素が水素供給源の一翼を担う。今世紀後半には、技術革新に加えて資源・環境制約の観点から、還元材の非炭素化や高炉-転炉法に代わる革新製鉄プロセスの登場も想像できる。また還元材としての石炭の利用と環境制約を両立させる手段として、製鉄プロセスで発生するCO2を未活用の中低温排熱を利用して分離回収する技術も有効である。

【化学】 石油(ナフサ)を原料および主燃料として利用しているため、2050年までには、石油を使わない新規の製造プロセスを完成させなければならない。現在は、ナフサを熱分解してエチレン、プロピレンあるいはBTXなどの基礎原料を製造する工程と基礎原料を基にして数万種類といわれている化学品にする合成工程とで成り立っている。

新規プロセスとしては、バイオマス、廃棄物および石炭をガス化して、COとH2の合成ガスとし基礎原料を製造し、合成プロセス以降は、既存の製造インフラを利用するのが合理的と思われる。化学では、投入エネルギーのうち60%が物質として保存されているので、製造プロセスで消費される40%のエネルギーを省エネおよびコプロダクションで削減するとともに物質中に保存されている60%のエネルギーを物質エネルギー再生するためガス化炉に投入することによって、必要エネルギー量の削減を目指す(このシステムをサステイナブル・カーボンサイクル化学体系(SC3)と命名する)。

【セメント】 原料として石灰石を、主燃料として石炭等を利用してセメントを製造しているが、廃棄物・副産物(高炉スラグ、石灰灰、副産石膏、廃タイヤ等)を受け入れて原料、燃料として利用し、廃棄物の固定化にも寄与している。将来的には、各分野や他業種で導入されるガス化炉からの残渣や紙パ産業からの再生できない紙の廃棄物など、多様な最終廃棄物を原料あるいは燃料として利用し、石灰石および燃料を一切を使わない「ゼロエミッション型セメント」プロセスが期待される。

【紙パ】 現在でも製品の60%を再生し、おおむね3回程度循環利用するとともに、パルプ工場の黒液は、重油や石炭などの燃料と一緒に製紙工場で電力や熱のエネルギーとして再生利用されている。将来的には、バイオマスガス化複合発電設備の採用により、化石燃料をまったく使わず、生産活動を行うだけでなく、外部への電力供給も行えるような製造プロセスが期待できる。また、バイオテクノロジーを利用した高成長樹木を生育させる技術は、業界を越えた効果が期待できる。

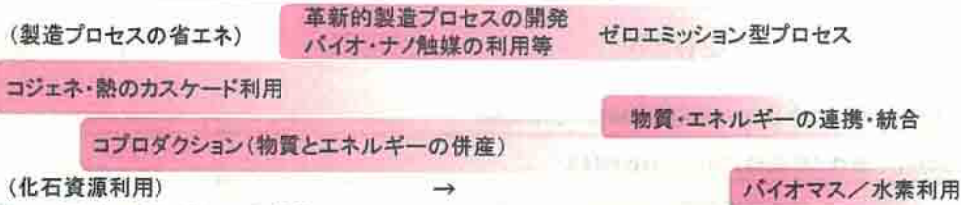
【共通技術】 炭素を物質として利用する業種を中心として、バイオマスや廃棄物は貴重な原料・燃料となってくるので、これらを含めた物質のマネージメント技術も今後必要となってくる。

産-3

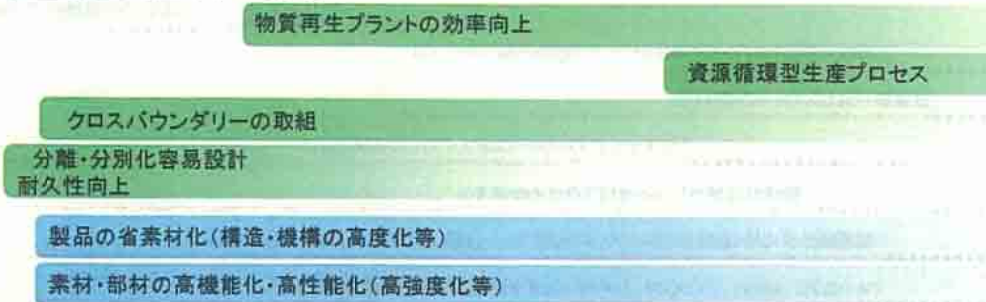
産業	2000	2030	2050	2100
製造量×製品の価値	1倍		1.5倍	2.1倍
転換分野からの供給が必要な必要エネルギー量※	—	25%削減	40%削減	70%削減
1) 製造エネルギー原単位改善	—	20%削減	30%削減	50%削減
2) 物質エネルギー再生率		50%	60%	80%
3) 高機能化(強度等) (機能/物質量)	1倍	2倍	3倍	4倍

※GDPに比例して効用(製造量×製品の価値)が増加した場合を基準として、転換分野からの供給が必要なエネルギー(単位当たり)の削減量

製造プロセスにおけるエネルギー利用の高度化『うまくつくる』



物質エネルギーの再生『上手につかう』



分野を越えた物質・エネルギーの再生利用

少ない資源での製品製造によるエネルギー削減『良いものをつくる』

産-4

概要	2000	2030	2050	2100
製造プロセスにおけるエネルギー利用の高度化『うまくつくる』		現行プロセス省エネ、次世代圧延技術等新プロセスの開発 SCOPE-21、新焼結等革新的プロセス技術の導入		革新的鉄鋼製造プロセス
省エネルギープロセス	製鉄			
	化学	石油化学原料省エネ生産技術	サステイナブル・カーボンサイクル化学体系(SC3)	
	セメント	既存セメント・エコセメントプロセスの省エネ化	ゼロエミッション型セメントプロセス	
	共通	高効率伝熱・断熱技術、高効率蓄エネルギー技術、産業用コジェネの高効率化、熱のカスケード利用、動力回生システム		
		バイオマス生産・利用促進技術(バイオテクノロジー等の活用)		
		革新的製造プロセス(バイオ・ナノ触媒の利用等)		
コプロダクション(物質・エネルギー併産)	共通	ガス化技術、GTインテグレーション		燃料電池型加熱炉
	化学	電力・水素・化学品コプロダクション		
		革新的蓄熱増熱技術(産業用ヒートトランスフォーマー、化学蓄熱など)		
	セメント	廃棄物ガス化による電力・熱のコプロダクション		
物質エネルギーの再生『上手につかう』	紙・パ	バイオマス利用	バイオマスIGCC	バイオマスIGFC
物質エネルギー再生	産業間連携	マテリアル・カスケード・マネージメント		
		非在来型化石燃料、劣質原料利用、廃棄物、バイオマスガス化		
		物質・副産物・エネルギー再生技術		
		微量成分除去、分離・回収、再資源化技術		
少ない資源での製品製造によるエネルギー削減『良いものをつくる』				
素材・部材の高性能・高機能化	製鉄	電磁鋼板 高張力鋼、革新的構造材料、溶接材料等		次世代型機能性材料
	その他	高機能・高強度プラスチック、超高強度・軽量セメント、高機能・高品位紙		
製品の省素材化		製品の省素材化(集積(モジュール)化、小型化)		

産-5

製造プロセスにおけるエネルギー利用の高度化『うまくつくる』

省エネルギープロセス

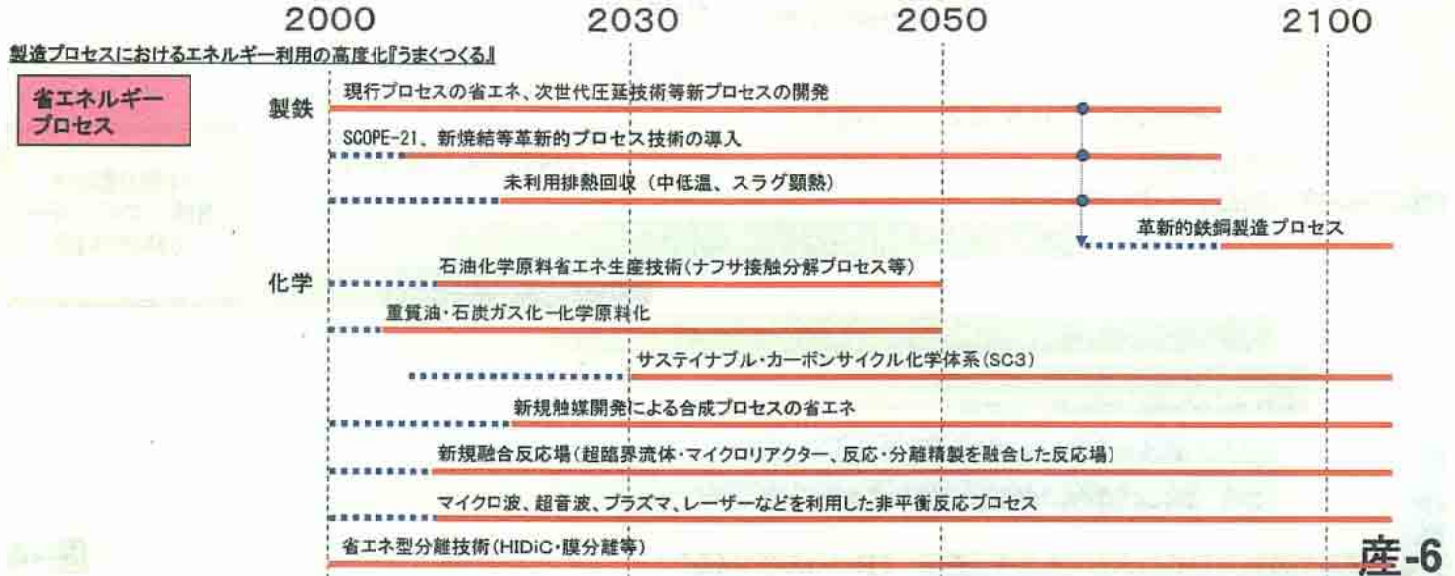
製鉄: 新たな鉄鋼プロセスは長期の開発期間を要する。少なくとも今世紀半ば頃までは現行プロセスの効率改善、改良型プロセスの開発導入などを促進することが重要となる。すなわち、2050年ごろまでは高炉・転炉+電気炉を基本とした現行プロセスの効率化が中心となる。この間、現行プロセス改良型(SCOPE-21等)の開発導入も設備更新タイミング等に合わせて行われる。今世紀後半に至ると、資源・環境等のさまざまな制約や、製品ニーズの変化等に応じた革新プロセスの具体化が求められると考えられる。超長期的には資源・環境制約の状況に応じて非炭素系還元材利用プロセスの可能性も視野に入れる必要がある。

化学: 21世紀前半では、化石原料を使用するプロセスの省エネ生産技術、新規融合反応場等を導入する。後半は、ガス化を伴うサステナブル・カーボンサイクル化学体系(SC3)により省エネルギー化を図る。すなわち、化学原料は、石油・天然ガスから石炭、重質油、バイオマスおよび廃棄物に移行していく。このため熱分解オレフィン製造からガス化-SC3に置き換わり、2030年で10%、2050年で60%導入される。2030年までは、ナフサ熱分解プロセスが接触分解プロセスに代替される。

セメント: 既存プロセスのセメント省エネ推進、エコセメントプロセスの省エネルギー化、最終的には石灰石・エネルギーがゼロ、即ち、廃棄物のみでセメントを作るプロセス(ゼロエミッション型セメントプロセス)が導入される。

紙・パ: 高効率乾燥技術、抄紙電力削減など、新しい省エネルギープロセスが開発される。超長期的には製紙産業自身は、購入電力、あるいは石炭等の燃料が不要となる。

産業全体・共通: 省エネ診断・ESCO等の活用、未利用エネルギーの地域での有効活用、産業間連携、工業炉やボイラーの高効率化、蓄エネルギー技術、バイオ・ナノ触媒の利用等による革新的製造プロセスなどにより省エネルギー化を図る。単純なボイラー・燃焼からガスタービンコージェネ等に移行する。

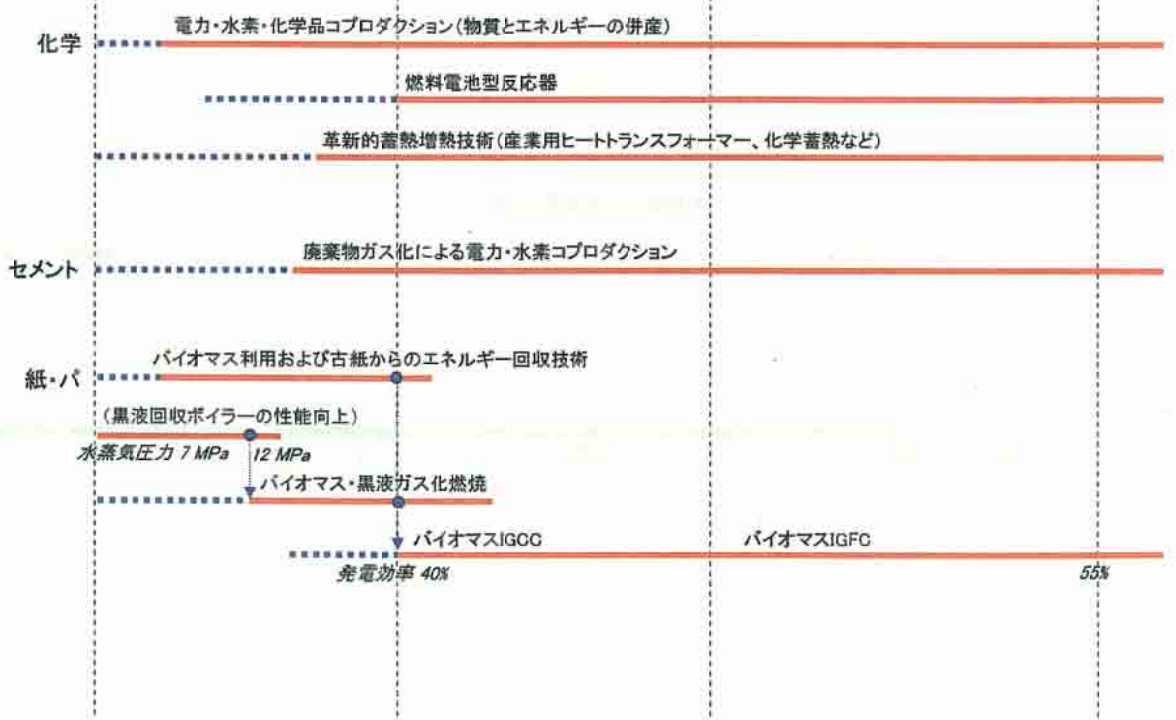
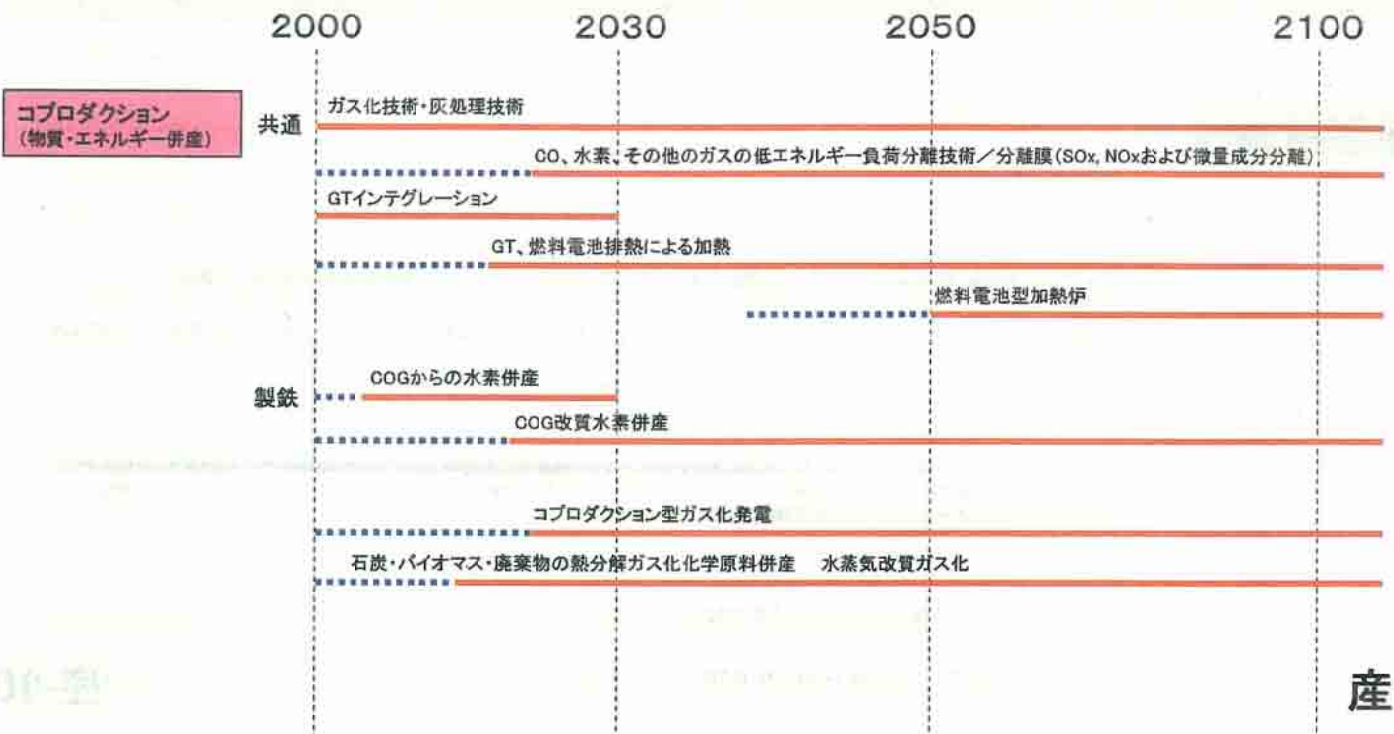


技術以外の要因

● 新プロセスの開発には、運転管理を含めたエンジニアリング的な開発要素が不可欠となるが、大規模な実証設備が必要となるため、民間だけの研究開発には限界がある。国家プロジェクトとしての決断が将来的には必要となる。

コプロダクション(物質・エネルギー併産)

従来、失われていたエクセルギー(有効に取り出しうる仕事量)を、電力あるいは水素として回収し、プロセスの省エネルギーを図る。
 共通技術:ガス化技術、それに伴うガス生成技術として重要である膜分離技術等を導入する。さらに、ガスタービンインテグレーション、および、ガスタービン、燃料電池の排熱による加熱方式の開発・導入を行う。最終的には、燃料をまず一旦燃料電池で発電して、その排熱を加熱炉に用いる燃料電池型加熱炉を導入する。
 製鉄:2030年ごろまでは、運輸分野へのCOG副生水素供給と、COG顕熱を利用した改質による水素増産の技術を確認する。また、製鉄プロセスによるバイオマスを含む廃棄物の熱分解ガス化技術などの高効率転換技術を確認する。2030年以降は、ガス化プラントと製鉄関連プロセスとの融合により、バイオマス・廃棄物利用を拡大する。
 化学:電力・水素・化学品のコプロダクション等を導入する。
 紙・パ:バイオマスおよび廃棄物を導入することにより、黒液ボイラー等をバイオマスガス化、IGCCあるいはIGFCに置き換えることによって高効率に物質・エネルギー併産を行う。



技術以外の要因
 ● 短期的にはいわゆる排熱利用等のエネルギー有効利用技術の導入が主力となるが、中・長期的には廃棄物等が有するエネルギーを積極的に活用することが求められている。このため、バイオマス・廃棄物のプロセス利用については、技術開発に加えて、業荷システムを含む制度構築や廃掃法等法制度面の改革が重要となる。

物質エネルギーの再生『上手につかう』

製品中に保存された物質エネルギーを物質として再生、あるいはエネルギーとして再生する。例えば、化学品をガス化して合成する技術体系や廃棄物を原料化する技術が求められる。

共通技術：産業間連携、あるいはマテリアル・カスケード・マネージメント、エコマテリアル化技術等を導入する。

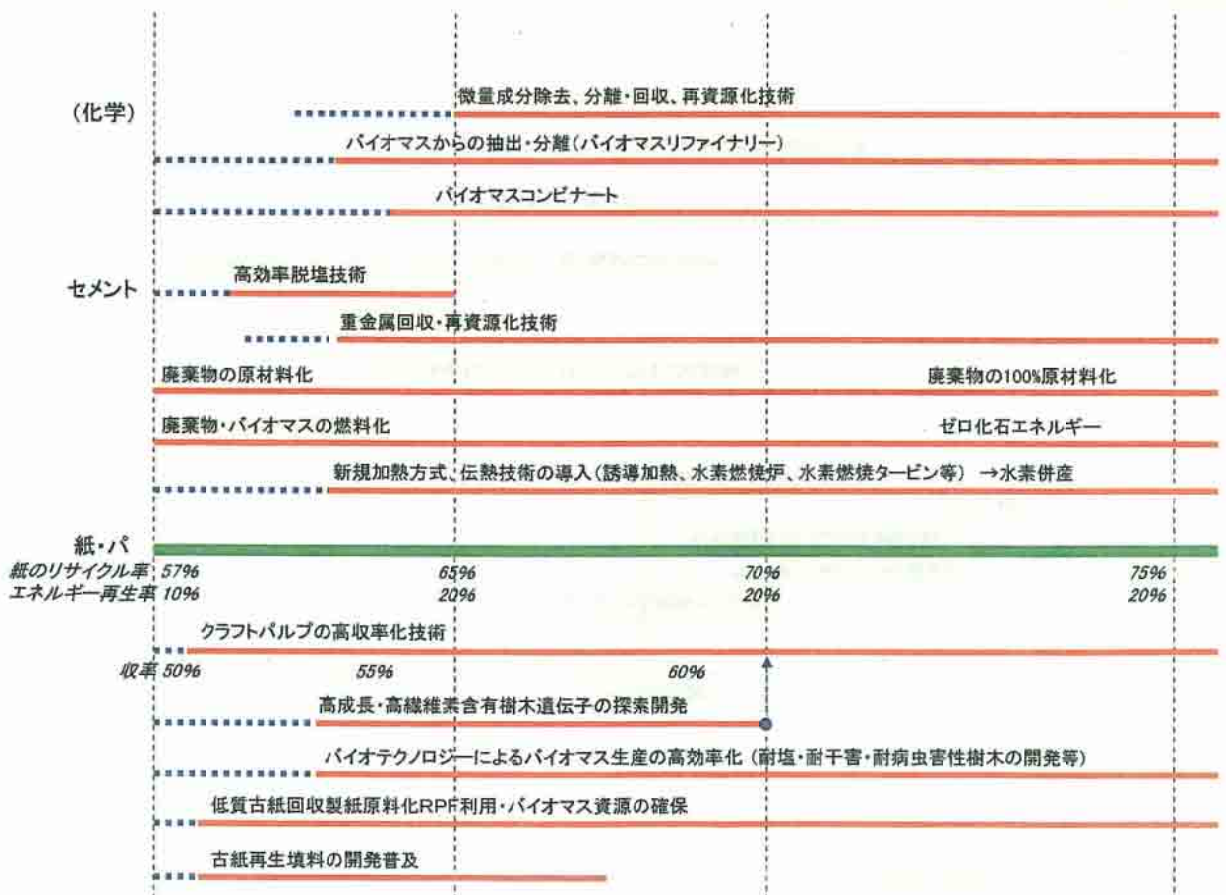
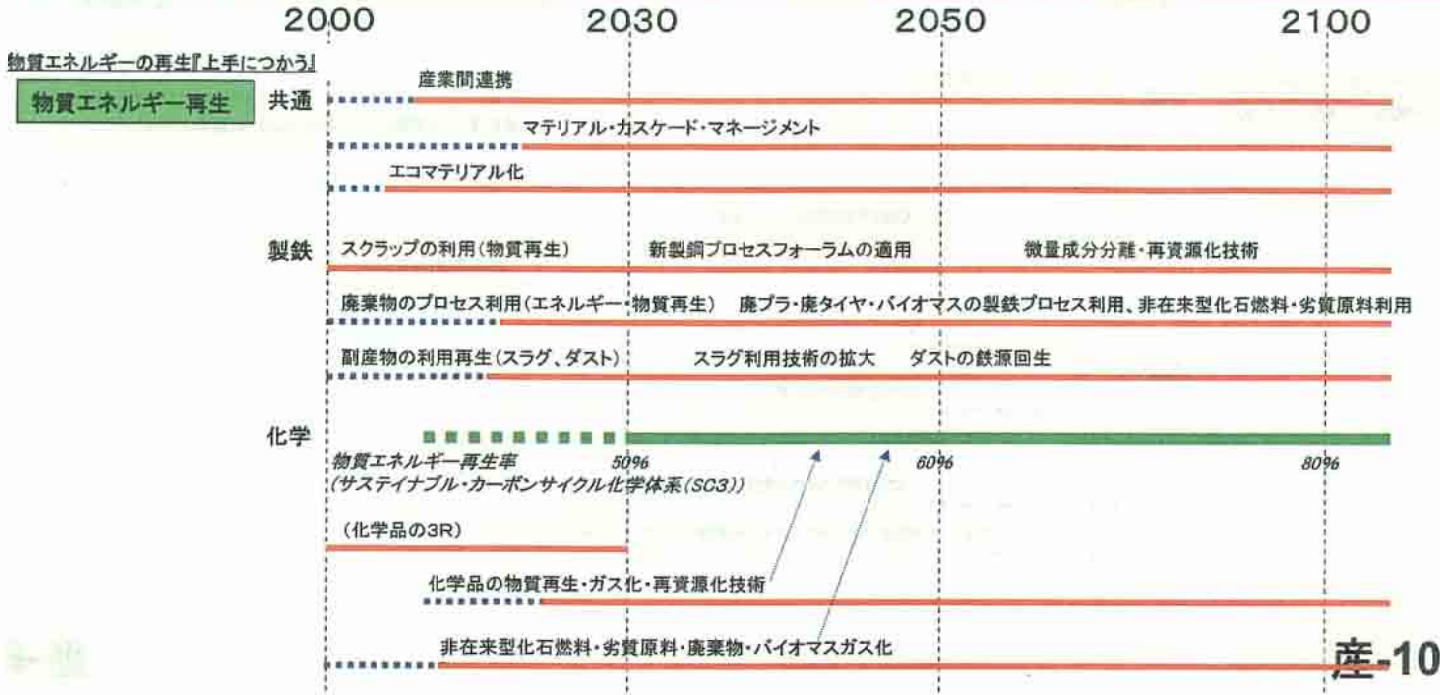
製鉄：従来からのスクラップの利用に加え、廃棄物の鉄鋼プロセスによるエネルギー利用、物質再生の拡大、スラグ等副産物の利用拡大を図る。

化学：非在来型化石燃料、劣質原料、廃棄物、バイオマス等をガス化炉に導入し再資源化を図る。物質エネルギー再生率として2030年で50%、2050年で60%、2100年で80%を想定している。それに繋げるまで化学品の3R技術で物質エネルギー再生の基礎とする。他の重要な技術としては、バイオマスの有効活用がある。

セメント：重金属の回収あるいは再資源化技術、廃棄物の燃料化技術が重要となる。最終的には化石エネルギーを全く使わずにセメントを廃棄物エネルギーだけで製造する。

紙・パ：現在の紙のリサイクル率60%は運用等の課題を解決しながら75%程度まで向上させ、木材チップの消費を現状の水準で維持しつつ紙の需要を賄う。単位面積あたりの木材収量を増やすため、優良遺伝子の探索や遺伝子工学等のバイオテクノロジーの活用が期待される。

$$\text{物質エネルギー再生率} = \frac{(\text{物質再生された物質の有するエネルギー量}) + (\text{エネルギー再生された量})}{(\text{製品中に保存された物質エネルギー量})}$$



技術以外の要因

- 21世紀前半では、物質・エネルギー源の多様化を図るため、バイオマス等の再生可能資源の活用が必要となる。
- バイオマス等の再生可能資源の利用については、技術開発に加えて、集荷システムを含む制度構築や廃掃法等の法制度面の改革も重要となる。

少ない資源での製品製造によるエネルギー削減『良いものをつくる』

素材・部材の高性能・高機能化

産業分野は各分野における技術革新のシーズを提供しており、このため、製品の高性能化は重要な課題である。国際競争力維持向上の観点からも重点的かつ継続的に取り組む必要がある。

製鉄：高張力鋼、高機能性電磁鋼板等の性能向上を図る。超長期的には現在の性能を大きく革新する新機能材料を開発する。

化学：高機能・高強度プラスチック等を導入する。一般的にコモディティ分野といわれる基礎化学品・基礎素材から、スペシャルティ分野である高機能物質、機能材料、部材・デバイスへ移行し、高度部材産業が化学の中心になる。

セメント：軽量セメントや超高強度セメント等を導入する。

紙・パ：紙はかなり軽量化が進んでいるため、高機能化が中心となる。

製品の省素材化

製品の集積(モジュール)化、小型化により省素材化を推進する。



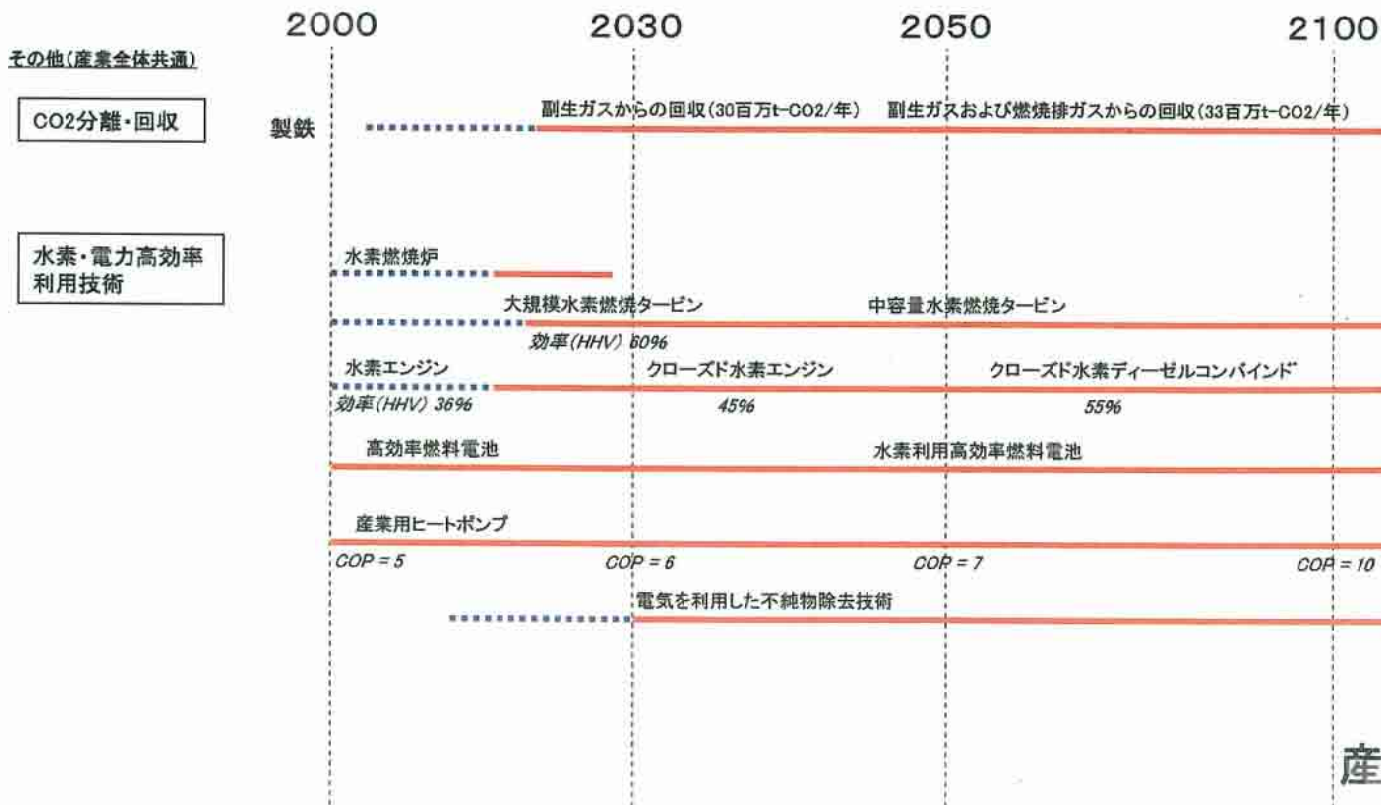
その他(産業全体共通)

CO2分離・回収技術: 特に製鉄において重要。製鉄の場合、まずCO2を高温度に含む副生ガス(高炉ガス)からのCO2分離が最も効率的と考えられ、まず取り組まれるべきである。

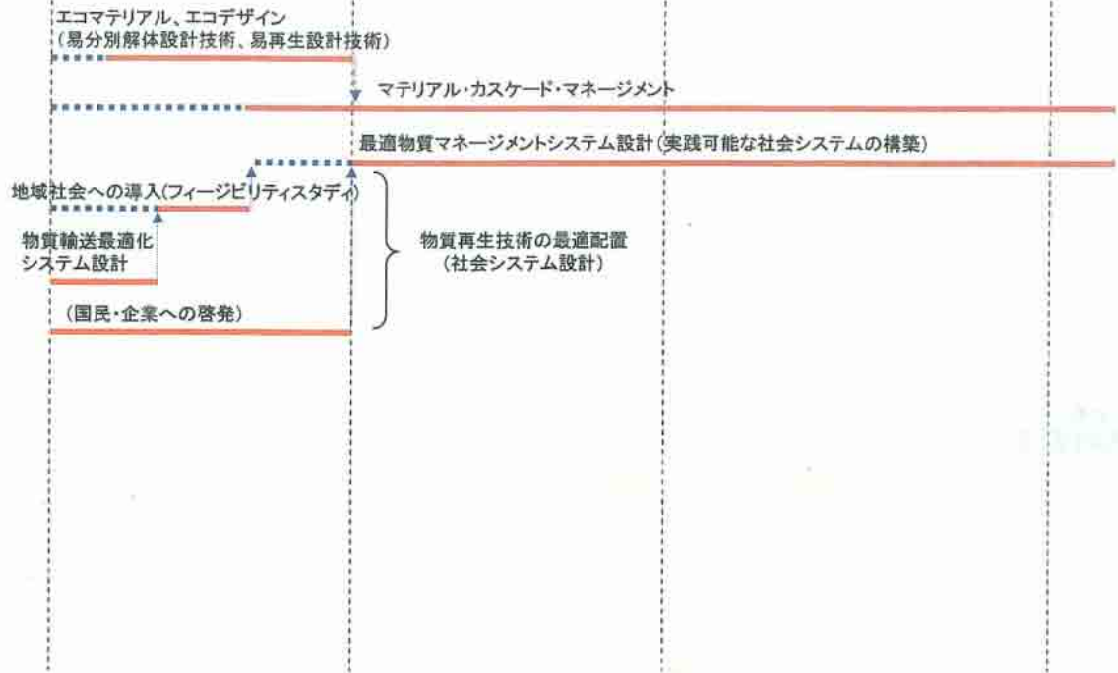
また、将来製造プロセスの改善等により副生ガス中のCO2が減少した場合には、副生ガス燃焼排ガスからのCO2回収も合わせて考慮することが重要となる。

水素・電力高効率利用技術: 転換部門からの電気、水素の高効率利用。水素燃焼タービン技術等水素を高効率に燃焼させる技術が重要となる。

物質マネジメントシステム: 技術のみではなく、社会システム設計が重要となる。



物質マネージメントシステム



技術以外の要因

- 末端の消費者が使用した産業製造物を如何に回収して、原材料などの原料として利用できるかがポイントである。このため製品は容易に分別解体が可能である設計、また容易に再生可能な設計が必要となる。
- 一方、末端にまで散在した製品等を効率よく回収するための社会的共通理念が必要となる。ここで産業設備等で発生する不要物質等は、比較的容易にシステムの構築は可能と考えられるが、一般消費者に行き渡った物質(製品)を効率よく回収し、また原材料等に戻してゆくためには、物質の輸送(物質輸送の最適化)、社会的適合性の評価(地域社会への導入)、さらには個人あるいは小規模事業者に対する啓発を併せて進めることが必要となる。

産業分野における CO2 排出量削減の方策と戦略

1. 産業分野の特徴

産業分野は、大きく①製鉄、②化学（化学繊維、石油製品を含む）、③セメント、④紙・パルプ（板紙を含む）、⑤その他の産業に分類される。⑤その他には、農林水産業、鉱業、建設業などの非製造業、機械、食品などの工業が含まれる。2000年度におけるエネルギー消費の割合（電力を含む）は、順に25%、33%、4%、6%、32%である。産業分野ごとにエネルギーの利用形態が大きく異なるため、必要エネルギーを削減する方策は分野ごとに異なり、また、実現できる削減の程度も異なる。従って、産業ごとに個別に方策を設定する必要がある。また、2100年のCO2排出量/GDPを、2000年に対して1/10とする目標は、個々の産業ごとではなく、産業全体で達成する方向で検討を行う。

そこで、①～④について、国内のエネルギーフローを各々モデル化して表記し、2100年の目標達成に向けて、そのモデルがどのように変化する必要があるかを示す。⑤のその他については、①～④の産業の合計と同様の変化をするものとして取り扱う。

また、それぞれの産業分野でのエネルギー効率改善には限界がある。現在すでに取り組まれている産業間連携に加え、民生部門で発生する廃棄物を再生資源として産業部門で利用したり、産業部門で発生する電気や水素などのエネルギーを民生部門や運輸部門で利用するなど、セクターの垣根を越えたクロスボーダーの取り組みがより重要になる。

2. 生産プロセスにおけるエネルギー消費の削減

図2-1は物質生産（物質転換）部門におけるエネルギー消費構造を示している。投入されたエネルギーは、①物質中に化学エネルギーとして保存されるもの、②主に燃焼過程でエクセルギー損失となるもの、③プロセスからの廃熱、の3つになる。

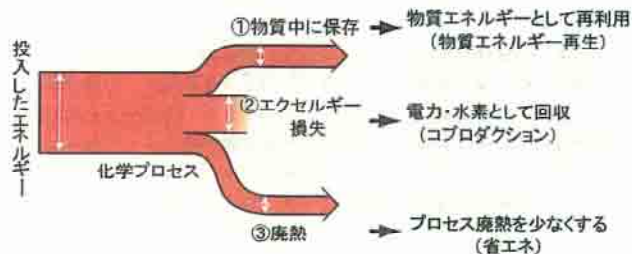


図2-1 物質生産（物質転換）部門におけるエネルギー消費削減

②と③を合わせたものが、プロセスで消費したエネルギーである。エネルギーを有効利用し、エネルギー消費を低減させるためには、それぞれ以下の1)～3)に示すような対策がある。

- 1) 物質エネルギー再生：物質あるいはエネルギーとして再利用する。
- 2) コプロダクション：失われていたエクセルギーを電力あるいは水素として回収する。
- 3) 省エネ：プロセスの省エネルギー化により、プロセス廃熱を低減させる。また、熱のカスケード利用等により排熱の有効利用を図る。

この1)～3)を組み合わせることによって、エネルギー消費の低減を図る。同時に、素材や製品の高性能化・高機能化を進めることによって、製造に必要な原料およびエネルギーを大幅に低減させることができる。以下に、①素材・製品の高性能化・高機能化による省資源・省エネルギー、②物質エネルギー再生、③

エクセルギーとは

コプロダクション、④省エネ、について、各々の考え方を説明する。

ここでは、エクセルギー損失を極限まで削減したシステムを描き、それに必要な技術を洗い出してきたが、現段階で具体的な技術のイメージになっていないところもある。これは、2100年の目標を達成するために、理論的に可能性を突き詰めた結果である。

エクセルギーとは
エネルギーには、熱エネルギー、電気エネルギー、化学エネルギー、機械エネルギーなど、さまざまな形態があるが、エネルギー量は同じでも形態によって質が異なり、有効な仕事として取り出せる割合は異なっている。このエネルギー総量のうち有効に取り出しうる仕事量をエクセルギーといい、その割合をエクセルギー率という。エネルギーは放逸がなければ熱力学第一法則により保存されるのに対して、エクセルギーは不可逆な状態変化やエネルギー変換過程で失われ減少する。

2.1 素材・製品の高性能化・高機能化による省資源・省エネルギー

素材や製品の品質を向上することは、国際競争力を維持し、市場を確保していく上で最も重要なことである。同時に長期的視点で、素材・製品の高性能化・高機能化によっても大幅な省エネ・省資源が達成できる。例えば、強度が2倍になれば半分程度の素材で同じ機能・効用が得られる。さらに、小型化、構造化により半分の素材で同じ機能を持つ製品を得るならば、 $1/2 \times 1/2 = 1/4$ でエネルギー・資源の消費量は1/4となる。

4倍の高機能化を行うことで、効用当たりの必要エネルギーが大幅に低減する。高機能化により製造量当たりの必要エネルギーが増加しないとすれば、効用当たりの必要エネルギー量は1/4（75%削減）となる。効用当たり70%削減の技術スペックを目指す観点から、高機能化を4倍とする技術スペックを設定した。高機能化により若干の製造エネルギーの増加があり得るので、他の技術スペックと組み合わせる必要がある。

素材・部材の高性能化・高機能化としては、鋼材削減や自動車の軽量化などに寄与する高強度鋼、革新的構造材料、溶接材料等あるいは高機能・高性能プラスチックの

研究開発さらには紙の軽量化技術・不透明化技術、質感増加技術などが重要となる。こうした高機能部材を利用した製品の省素材化技術も普遍的な重要技術である。

2.2 物質エネルギー再生

物質とエネルギーは保存されているが、ともに利用する過程で劣質化する。劣質化した廃棄物を物質再生させるには、不純物の分離・精製にエネルギーを必要とする。エネルギー資源量の制約とCO₂排出量の制約に加えて、物質循環の制約（原材料資源量の制約と廃棄物排出量の制約）を考慮すると、できる限り物質再生とそれに必要なエネルギーの低減を図り、原料資源と生産エネルギーの消費を抑制することが重要となる。また、物質再生を行わない廃棄物は物質の持つエネルギーを回収（エネルギー再生）する。

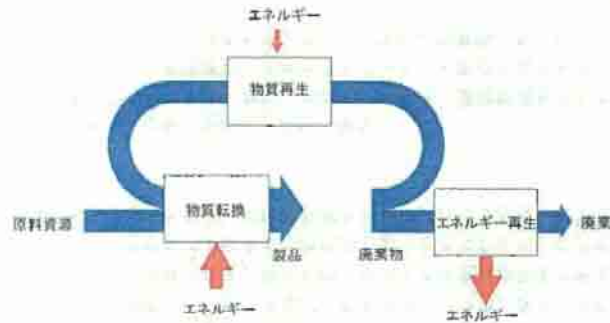


図2-2 物質エネルギー再生の概念

物質の有するエネルギーとは、その物質を完全に酸化させたときに得られるエネルギーであり、物質エネルギーと呼ぶこととする。例えば鉄は1トン当たり7.4GJの物質エネルギーを持っている。製品に保存された物質エネルギーを物質として再生する、もしくはエネルギーとして再生する割合を物質エネルギー再生率と呼び、下記の式で表す。

$$\text{物質エネルギー再生率} = \frac{(\text{物質再生された物質の有するエネルギー量}) + (\text{エネルギー再生された量})}{(\text{製品中に保存された物質エネルギー量})}$$

原料のエネルギーが全て製品に保存される極端なケースでは、物質エネルギー再生率を70%とすることで、効用当たりのエネルギー消費の技術スペックである70%を達成することが可能である。

製品に保存される以外に、エクセルギー損失および廃熱としての損失があることを考慮し、物質エネルギー再生率を70%以上に設定することが望まれる。そこで、技術スペックとしては、70%より若干上げた80%を設定した。

物質エネルギー再生率を上げるには、化学品をガス化し合成する技術体系や廃棄物

を原料化する技術が求められる。

2.3 コプロダクション

エネルギーは放逸がなければ熱力学第一法則により保存されるのに対して、エクセルギーは、不可逆な状態変化やエネルギー変換過程で失われ減少する。我が国の一次エネルギーのうち有効に使われている割合は3割弱に過ぎず、6割以上が無駄になっている。このうち大部分はエクセルギー損失であり、主に化学エネルギーをエクセルギー率の低い熱エネルギーに変換（燃焼）したためである。

エクセルギーの観点から、エネルギーを有効に使うためには、

- 1) エネルギー変換・利用の過程でエクセルギー損失が少なくなるように工夫する
 - 2) 廃熱の有効利用を図るのではなく、廃熱そのものを出さないようにする
 - 3) 低レベルの熱を燃料の燃焼で得るのではなく、ヒートポンプやコージェネを利用する
- などが重要となる。

エクセルギー損失が少なくなるように、できる限り熱は発電あるいは物質生産（発熱反応）とともに発生させるか、燃料としてはエクセルギー率の低い水素に排熱を利用して変換してこれを燃焼させて得る。既存のエネルギー・物質生産体系を見直し、物質とエネルギーの併産（コプロダクション）を図ることによって、エネルギーと物質の消費を極力抑える。例えば、化学品とエネルギーのコプロダクション化を目指して、熱化学ヒートトランスフォーマー技術およびエネルギーインテグレーションを駆使したプロセス設計創生手法を開発し、エクセルギー損失の最小化を図る。

2.4 省エネ

現在行われている省エネを推進し、プロセスで消費するエネルギーを削減し、廃熱を減らすことが必要であるが、それだけでは必要エネルギーを大幅に削減することは困難である。革新的なプロセスを開発し、技術体系を構築することが求められる。

コプロと省エネにより、製品当たり製造に必要なエネルギー（製品に保存されるエネルギーを除く）を50%削減することを技術スペックとした。このことだけでは、効用当たりの必要エネルギーを70%削減することは不可能であり、他の技術スペックと組み合わせ合理的に実現することが求められる。

後述の産業各分野のモデルでは、省エネで33%程度の削減を、コプロダクションで失われたエクセルギーの33%程度を再生することを目安に検討を行った。

製鉄では、次世代圧延技術の開発や新焼結等革新プロセス技術を導入し、さらには、革新的鉄鋼製造プロセスの開発が求められる。化学では、新規触媒開発による合成プロセスの省エネだけでなく、物質エネルギー再生を可能とするカーボンリサイクルする化学体系が求められる。

3. 分野ごとの方策

製鉄、化学、セメント、紙・パルプについて、分野ごとにエネルギーフローをモデル化して 2000 年実績と 2100 年に想定される姿を示し、2100 年への変遷を提案する。

3.1 製鉄産業

(1) 鉄鋼プロセスの現状

図 3.1-1 に鉄鋼プロセスの概要を示す。鉄鋼プロセスは、鉄鉱石を主原料とする高炉-転炉法と、鉄スクラップを主原料とする電気炉法に大別される。現在の国内粗鋼生産に占める転炉鋼と電炉鋼の比率は 7 対 3 程度で推移している。生産される鉄鋼製品は、厚板、鋼管、薄板、表面処理鋼板、線材、形鋼など多岐にわたっており、約 35% 強が鋼材として、約 23% が自動車などの製品として輸出されている。

鉄鋼プロセスのエネルギー利用上の特徴は、①鉄鉱石を還元する製鉄工程で約 80% のエネルギーが消費されること、②コークス炉-高炉-転炉工程で副生ガスが発生し、燃料、電力、その他の用役にカスケード利用されること、③排熱回収が徹底されていること、④電力・工業ガス等の系外供給が行われていること、⑤廃プラスチックなど廃棄物のプロセス利用が行われていることなどがあげられる。

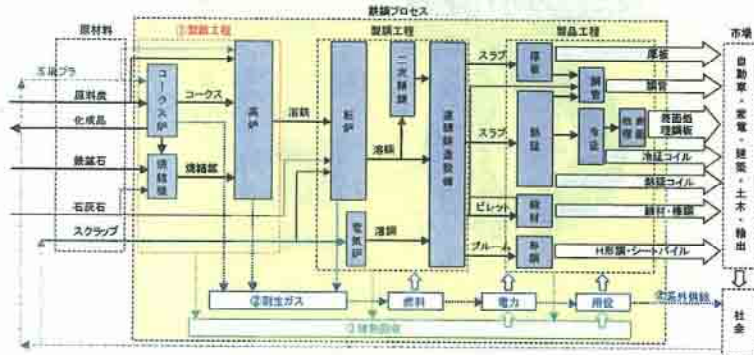


図 3.1-1 鉄鋼プロセスの概要

(2) 現在～今世紀半ばまでのシナリオ

我が国の鉄鋼業は、70 年代の石油危機以降、連続製造設備に代表されるような生産プロセスの効率化や排熱回収設備の開発導入を積極的に行ない、90 年代にはほぼ一巡する状況となった。以降のプロセス効率改善は、鉄鋼プロセスの更新に伴う効率改善と廃棄物の有効利用が中心となってきたが、今世紀前半もその延長線上にあるものと想定される。

鉄鋼プロセスは一般に設備規模が大きくまた寿命が長いという特徴を有する。例えば高炉の場合、現在国内で 28 基が稼働中であるが、それぞれ 15～25 年に一度、数百億円をかけて改修が行なわれる。改修にあたっては高炉の基本プロセスは変わらないものの、制御システムや周辺機器などにその時々最新の技術が導入され、エネルギー

効率も確実に改善されている。またコークス炉の場合、現在国内で 44 基が稼働中であるが、向こう四半世紀の間に順次設備寿命を迎える。コークス炉の更新にあたっては、石炭事前処理工程と高効率乾留工程並びにコークス改質工程を特徴とする次世代コークス炉 (SCOPE-21) の導入が期待されている。以上のように、今世紀半ばまでは既存プロセスの改修改善に加え、設備更新タイミングにあわせた次世代プロセスの導入による飛躍的改善も一部の工程で期待される。図 3.1-2 に初号機導入が計画されている次世代コークス炉 (SCOPE-21) の概要を示す。

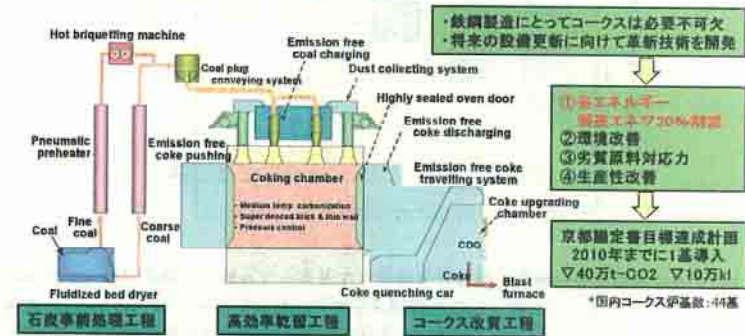


図 3.1-2 次世代コークス炉 (SCOPE-21) の概要

また高炉やコークス炉は、高温・還元雰囲気など反応炉や分解炉としての優れた条件をそそえており、廃プラスチック等の廃棄物のリサイクルに適している。加えて廃プラ等の熱分解によって発生したガスや炭化水素油、コークスもすべて既存のプロセスで高効率に利用することができるため、極めて高い物質・エネルギー利用効率を得ることができる。今後は廃プラスチックに加えて、廃タイヤ、バイオマスなど、さまざまな廃棄物の活用による一次投入エネルギーの削減がさらに進められると考えられる。図 3.1-3 にコークス炉における廃プラスチック再資源化の概要を示す。また原料炭や廃プラスチックからコークスを製造する際コークス炉ガスが発生する。コークス炉ガス中には大量の水素が含まれており、PSA 法等によって簡便に分離回収することができる。再生可能エネルギーを利用した水素供給が可能となるまでの間、この副生水素が民生・運輸部門における水素供給源の一翼を担うものと期待される。加えて、現在未回収となっている廃熱による水素を増幅は、省エネルギー (排熱回収) の観点からも重要な課題である。図 3.1-4 に副生水素供給の概要を示す。

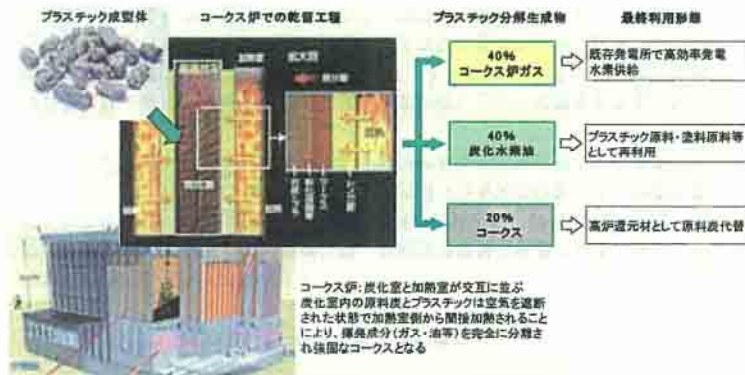


図 3.1-3 コークス炉での廃プラスチック有効利用の概要

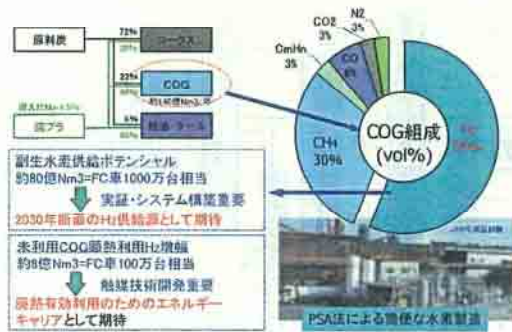


図 3.1-4 副生水素の供給の概要

(3) 今世紀後半のシナリオ

今世紀後半には、現時点では技術的にも経済的にも成立困難な還元剤の非炭素化・非化石化や、高炉一転炉法に変わる革新製鉄プロセス実現の可能性はある。しかしこのようなプロセス革新は、現在確立している原料炭を出発原料としたエネルギーのカスケード利用システムや、セクターを越えた廃棄物の利用システムなどに大きな影響を与えると考えられ、これらの課題を克服する対策技術の検討もあわせて必要となる。

また一貫製鉄所においては、原料炭から持ち込まれる炭素の約90%は副生ガスとなる。加えて未だに未活用となっている低レベル廃熱が存在する。そこで製鉄プロセスで発生するCO₂を中低温未利用廃熱を利用して回収する技術も、還元材としての石炭の利用と環境規制を両立させる手段としては有効と考えられる。図 3.1-5 に一貫製鉄所でCO₂回収の概要を示す。

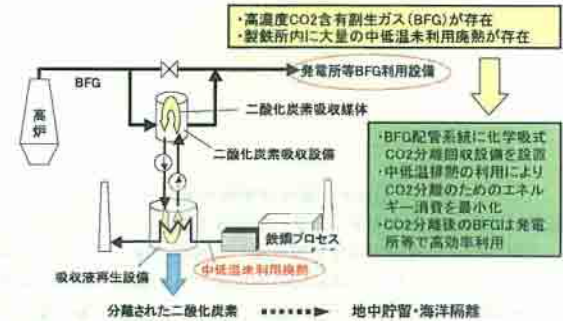


図 3.1-5 中低温未利用廃熱を利用した副生ガスからのCO₂分離回収の概要

(4) 製品性能改善の重要性

鉄鋼産業に限らず製造業にとって製品の性能は競争力の源泉である。天然資源に乏しい我が国が将来にわたって国力を維持するためには、産業の国際競争力維持向上は必須である。また、今回検討のテーマであるエネルギー資源の有効利用、環境規制への対応を各セクターが実現するためにも、性能の優れた製品を供給する責任は産業部門が負っている。

図 3.1-6 に高強度鋼板(ハイテン)の利用拡大による自動車軽量化効果とこれに伴う燃費改善効果を、また図 3.1-7 に電磁鋼板の性能改善による鉄損の改善効果とそれによるCO₂削減効果をそれぞれ示す。いずれも素材品質の改善による最終商品の性能改善を示しているが、このような高い技術力が国際競争力の確保とともに、民生・運輸・転換部門における製品を通じたエネルギー資源有効利用・環境対応の源泉を担うことになる。

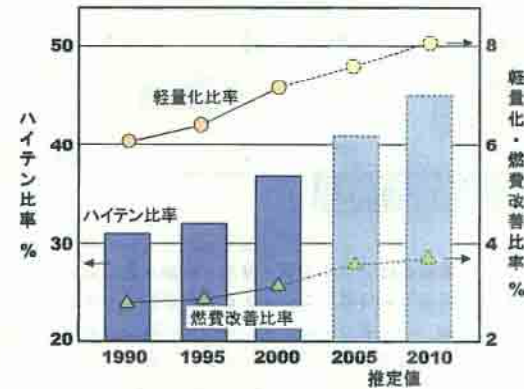


図 3.1-6 高強度鋼板比率拡大による自動車軽量化効果

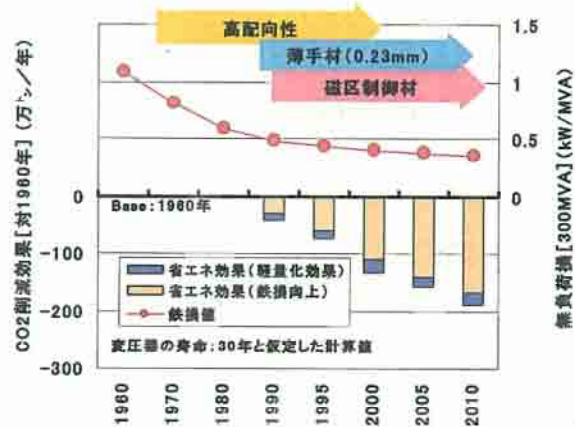


図 3.1-7 電磁鋼板性能改善による損失低減効果

(5) クロスバウンダリーの取り組みの重要性

鉄鋼を始めわが国の産業の多くはすでに省エネルギーを徹底しており、単独での更なる効率改善は極めて困難状況にある。近年取り組みが本格化してきた産業間連携は、異なる事業者同士が連携してエネルギーや副産物を利用しあい、コンビナート大での総合効率を改善しようとするものである。また鉄鋼業が取り組んでいる産プラスチックの有効利用や、将来期待される副生水素の供給は、民生・運輸部門とセクターを越えて物質やエネルギーを供給しあい、総合効率を高めようとする取り組みである。このようにセクターを越えたクロスバウンダリーの取り組みはトータルのエネルギー効率、物質利用効率の改善に繋がるものであり、今後さらに重要性を増すものと考えられる。図 3.1-8 に鉄鋼業におけるクロスバウンダリーの取り組みの概要を示す。製鉄所の境界をはさんで、鉄鋼生産のための原材料や鉄鋼製品以外のさまざまな物質やエネルギーが入り出していることがわかる。

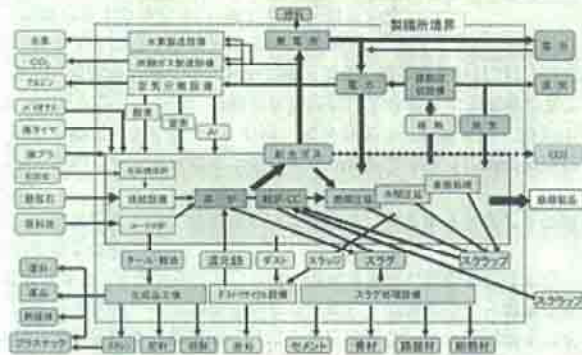


図 3.1-8 鉄鋼業におけるクロスバウンダリーの取り組み

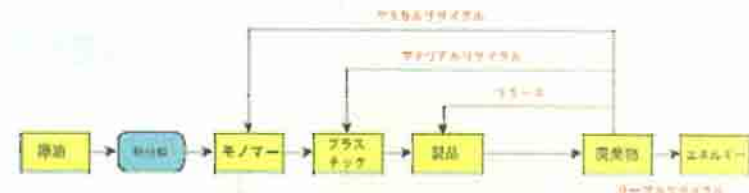
3.2 化学産業

(1) 2100年の想定される姿

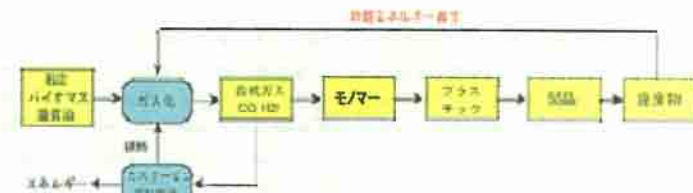
エネルギーとして安価な原料が素材原料としても使われてきたが、石炭以外の化石燃料が使えない2100年になっても、同様に安価な原料が利用されるであろう。よって、バイオマス、廃棄物および石炭をガス化してCOとH2からエチレン、プロピレンあるいはBTXなどの基礎原料(モノマー)を製造し、数万種類に達するといわれている既存の化学品の合成インフラに乗せていくのが、唯一の解と思われる。

化学産業では、原料の60%のエネルギーが物質中に保存され、30%がエクセルギー損失であり、廃熱はおおよそ10%である。大幅にエネルギー消費を低減するには、60%を占める物質中に保存される物質エネルギーを再生し利用する仕組みが欠かせない。

プラスチックを例にして、現状の物質の流れを示したのが図 3.2-1 である。エネルギーが保存されている物質、いわゆる廃棄物は、モノマーに分解されて再重合されるか、プラスチックのまま再成型される、もしくは、そのままの製品形状で再利用される。また、焼却によりエネルギーに変換される。



従来技術



新技術: 物質・エネルギー再生

図 3.2-1 従来技術および新技術における物質のフロー(プラスチック)

2100年には、原油や天然ガスが存在せず、また生産と処理に関する二酸化炭素排出量を大幅に削減することが求められている。つまり上述の従来技術では、廃棄物の量は減るものの、原料取得の制約を根本的に解決できない。

また、物質(ここではプラスチック)は加熱処理を行うことで分子量の低下という

劣質化が生じてしまうため、一部の廃棄物は焼却せざるを得ないことになり、二酸化炭素が排出することになる。

従って、資源制約と二酸化炭素排出量削減に対応するためには、まず廃棄物を殆どゼロにするシステムが求められる。そこで廃棄物をガス化し、ガス化により製造された合成ガス（一酸化炭素と水素）からプラスチック等の原料を合成し製品を製造する、物質エネルギー再生が必要となる。

このガス化するための原料としては、廃棄物だけではなく、バイオマスなどを使用することも可能となる。

上記の概念を定量的に説明したものが図 3.2-2 である。(1)に示すように現行石油化学プロセスでは、おおよそ投入エネルギー100の内、60が物質中に保存され、30がエクセルギー損失、10が廃熱となっている。プロセスの改善により省エネを実施することで、エクセルギー損失と廃熱量を減らすことが可能である。例えば、(1)におけるエクセルギー損失と廃熱量を2/3に減らすことができた場合には、製品を60のままとする、(2)に示すように原料を100から87に減らすことができる。

さらに、コプロダクションの導入により、エクセルギー損失を減らし電力・水素に再生することが可能である。(3)はコプロダクションによって、エクセルギー損失のうち1/3を回生して、電力・水素が7、生産されたとして図示している。

化学産業では、このように省エネおよびコプロダクションを推進しても、製品60のために原料が87必要となる。そこで省エネルギー目標を達成するためにさらに、物質・エネルギー再生の概念を導入し、物質中に保存されたエネルギー、60のうちの80%、すなわち48を、原料に戻すことができると仮定すると、(4)に示すように、原料を39まで低減することが可能となる。

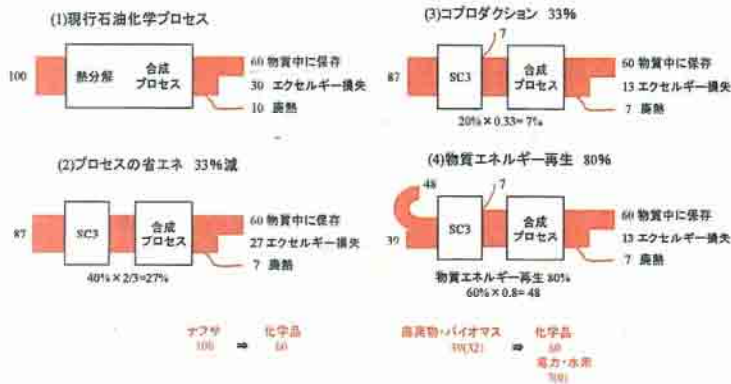


図 3.2-2 化学産業のモデル

最終的に新たな39のエクセルギーと回収された48のエクセルギーから60の製品を生み出し、7の電気・水素を生産することになる。この概念を実現するには、ガス化

により廃棄物を受入れガス化するとともに、ガス化で生成した合成ガスから化学製品を製造するプロセスの技術が必要である。

(2) コプロダクションによるエクセルギー回収

ガスタービンインテグレーションによるコプロダクションについて、熱分解によるエチレン製造を例に説明する。

原料から化学品を吸熱反応である熱分解によって生成させる場合、通常、燃料を燃焼し反応に必要な熱を投入する。また、発電は燃料を燃焼し、スチームを発生させ電力とする。ガスタービンを導入し、ガスタービンにより発電し、その廃熱を熱分解反応に利用するフローを図 3.2-3 に示す。図において、上段の数字はエンタルピーのレベルを表し、下段はエクセルギーのレベルを示す。

従来の方式では、10の燃料から4の電力を発生し、20の原料から120の化学品を製造していた。30の原料・燃料をエクセルギーの損失を小さくするよう加圧燃焼し、高温高圧のガスによりガスタービンを駆動し、10の電力を生む。一方、高温のガスタービン排気ガスを熱分解反応に使用し、120の化学品を製造する。その結果、6の電力を生み出すことができる。このインテグレーションによりエクセルギーロス小さくしたことになる。

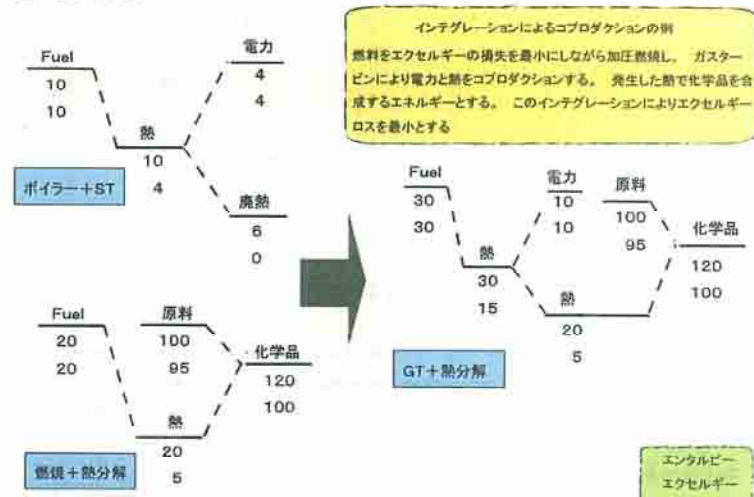


図 3.2-3 ガスタービンインテグレーションによるコプロダクション

(3) 技術の推移について

2100年の姿に至る過程では、石油や天然ガスを原料として使える期間がある。その間に省エネを推進するだけでなく、来るべき2100年の姿にソフトランディングするための技術を開発していく必要がある。その意味から、2100年から遡り、技術が推移

する様を検討した結果を示す。

現在主流のナフサ留分の熱分解によるエチレン製造は極めて大量のエネルギー消費プロセスであることから、化学産業での大幅な省エネ化を実現するためには基礎原料（エチレン、プロピレン、BTX）製造段階への省エネ型プロセス導入が必要であり、原料面からの技術推移を整理すると概ね図 3.2-4 のようになる。

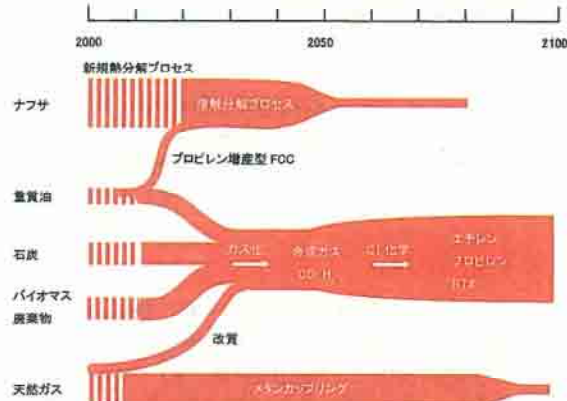


図 3.2-4 化学産業における原料面からの技術推移

ナフサを原料とした熱分解プロセスは省エネ型新規熱分解プロセスを経て接触分解プロセス（プロピレン増産型 FCC からさらにエチレン収率を高めたプロセス）へと移行し、原油がピークアウトするまで存続する。一方で、化石資源のうち比較的埋蔵量の多い天然ガスからの直接転換技術が開発され、メタンカップリング法¹等によるオレフィン製造プロセスが導入される。

さらに、長期的には各種炭素源からのガス化による合成ガス（CO、H₂）を経て、SC3 化学（Sustainable Carbon Cycle Chemistry: C1 化学体系を含んだ持続的なカーボンサイクル化学）によるオレフィン製造に移行する。また、この過程においては重質油の分解や天然ガスの改質（steam reforming、部分酸化、自己熱改質）を含みつつ、最終的にはバイオマス、廃棄物などの再生可能資源からのガス化による合成ガス製造へと集約化される。

また、現在の末端にまで広がった石油化学製品の成立背景および消費者の利便性を考えるとこれら全ての化学品を合成ガスから直接合成することには相当の困難が伴うことから、多くの化学品においては現状の製造フローが踏襲されるが、一方では原料の転換、また原料の取得方法の変化に伴う革新的な合成プロセスの開発が必要となる。

¹メタンカップリング法は気相酸素、触媒格子酸素、触媒吸着酸素などの酸素種の存在下でメタン 2 分子を結合してエタンまたはエチレンに転換する反応である。

次に、化学合成フローを製品面から眺めると、次のようになる。

①ガス化：化学原料併産型 IGCC/IGFC

化石資源を含む多様な原料を用いてガス化（合成ガス製造）され、IGCC/IGFC により電力生産が行われる一方、合成ガスが化学原料として利用される。ガス化原料は最終的にはバイオマス等に移行する。

②SC3 化学（サステナブル・カーボンサイクル化学体系）：合成ガスからのエチレン、プロピレン、BTX の直接合成技術

エチレン、プロピレン等を出発とした現在の石油化学製品の生産体系を維持するために、合成ガスからのエチレン、プロピレン製造が行われる。合成ガスからの直接合成や、メタノール経由プロピレン生産など多様な技術が開発されているが、最終的には経済合理性を持ったプロセスに集約されることになる。

③革新的合成プロセス：インテグレーションによる化学品合成プロセスの革新

既存のエチレン、プロピレンからの石油化学フローは維持されるが、個々の化学製品生産プロセスにおいては革新的な触媒開発等により、省エネ化が実現されることになる。

④接触分解：熱分解から低温接触分解へ

最終的なバイオマス/SC3 化学による石油化学体系に至る段階（～2050 年）においては、石油精製において現在導入されている接触分解同様のプロセスにより基礎原料の製造が行われる。

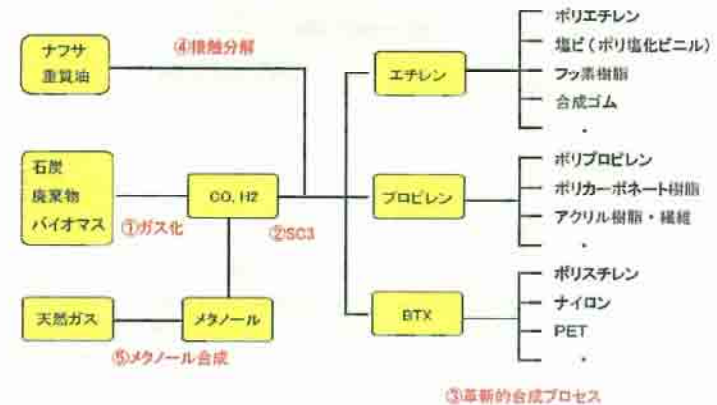


図 3.2-5 製品面からの化学合成フロー

(4) 化学産業のプロセス導入ロードマップ

以上の基本的考え方およびエネルギー消費率等の見通しに基づいて、資源・環境制約条件下における化学産業の技術を検証した結果、プロセス導入ロードマップは概ね次のように整理される。

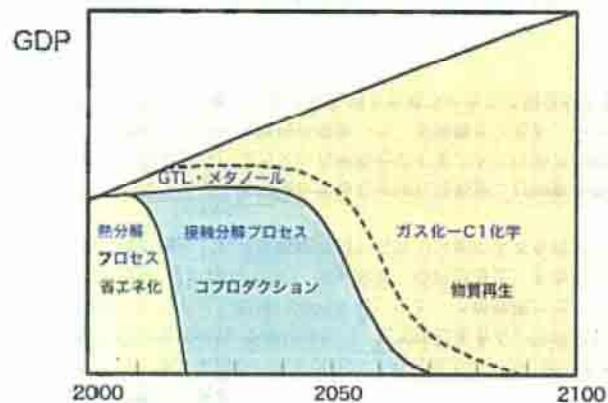


図 3.2-6 化学産業のプロセス導入ロードマップ

GDP 増大に伴い石油化学製品の生産量も増大するが、その原料であるオレフィン製造技術のロードマップは、

- ・ 2010-2020 年：熱分解プロセスの省エネ化は進展するが、漸次、接触分解プロセスへ移行する。
- ・ 2010-2020 年：海外の低廉な天然ガスを利用した GTL・メタノール・DME が輸入され、その一部が石化原料として用いられる。
- ・ 2040 年- : 2020~2040 年にガス化/SC3 化学プロセスが逐次開発導入され、2040 年以降に本格的な導入期を迎える。

3.3 セメント産業

(1) 2100 年の想定される姿

資源制約と二酸化炭素削減の観点から、2100 年のセメント産業を考えた場合、他業種や他分野から出てくるガス化残渣などの最終廃棄物を原料とし、石灰石や石炭等の化石エネルギーを使用しない産業が想定される。

(2) 技術ロードマップ

セメント産業における技術導入のロードマップは次のように想定している。既存のポルトランドセメントは石灰石を主原料に粘土、珪石、鉄等を焼成して生産されている。一方、廃棄物からの焼却灰中にはセメント製造に必要な成分が含まれているため、これを利用することが可能であり、現在でも制限はあるものの実用化されている。

このように、セメント産業は原料や燃料に大量の廃棄物・副産物（高炉スラグ、石

炭灰、副生石膏、廃タイヤ等) を利用できる静脈型産業であり、将来にわたって、各産業および民生部門から排出された廃棄物の有効利用に資する。

エコセメントは都市ゴミ、焼却灰、下水汚泥を主原料にした新しい品質のセメントであり、廃棄物問題を解決する一手段としての期待も大きい。現在は、原料廃棄物に含まれる塩素(約 1%) のため用途が限定されているが、脱塩素技術の開発により通常セメントに近いものを開発することが可能である。

ゼロエミッション型セメントは廃棄物利用を一層進め、原料のほぼ 100% を廃棄物としたものである。つまりセメント製造時はもちろんのこと、他産業部門での廃棄物削減に多大な貢献が期待できる。

以上のように、セメント産業においては、図 3.3-1 に示すように現状よりも一層省エネ化を進めつつ、将来の循環型社会における廃棄物を利用したゼロエミッション型セメントへと移行するものと推定される。

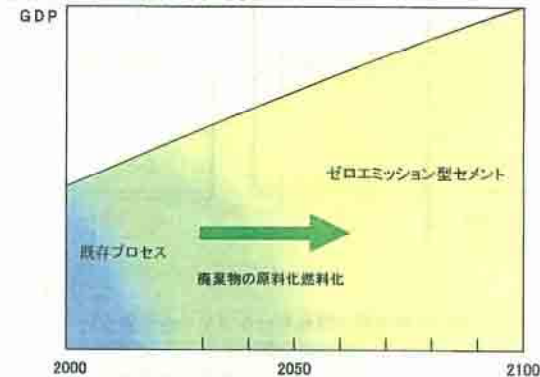


図 3.3-1 セメント産業のプロセス導入ロードマップ

(3) エネルギーバランスの推移

現在は、図 3.3-2 に示すように石灰石を原料とし、廃棄物等を燃料としてセメントを生産している。ここで、国内と輸出は販売量であり、統計上、その合計が生産量と一致していない。

2100 年においては GDP が 2 倍になると想定しているが、製品の高性能化を図ることによりセメントの生産量を 1.6 倍に抑えることが可能となる。また、前述したように、2100 年におけるセメントは全てゼロエミッション型セメントである。

このゼロエミッション型セメントを現行の 1.6 倍、生産するために、原料として廃セメント・廃棄物等が投入される。ここで必要となるエネルギー量は現在の 1.6 倍となるが、省エネルギープロセスの導入により 33% が削減できると仮定している。

なお、原料廃棄物中には塩素、重金属等が含まれていることから、これまでに開発された高効率脱塩技術、重金属回収技術により回収された塩素および希少金属の有効利用を図ることが必要になる。

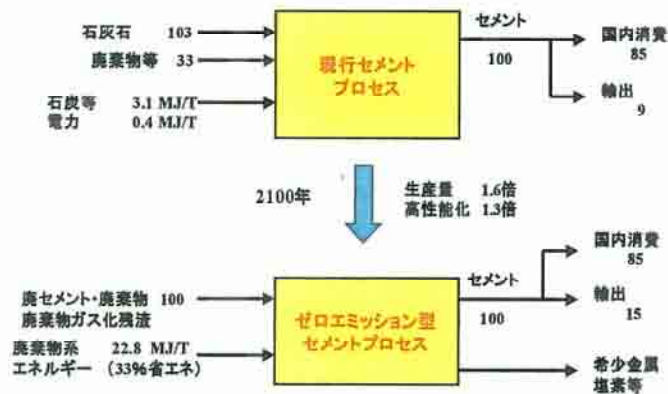


図 3.3-2 セメント産業におけるエネルギーバランスの推移

3.4 紙・パ産業における将来技術予測

(1) 紙・パ産業の現状

紙・パ産業では製品の60%を再資源化し、概ね3回程度循環利用され、循環型社会の実現に近づいている。投入チップの約50%は黒液に、また残りの50%はパルプとなって製紙原料となる。黒液は燃料として生産工程に必要な蒸気あるいは電力に転換させて利用しているが、黒液由来のエネルギーだけでは不足するので、化石燃料(重油・石炭)を追加投入している。

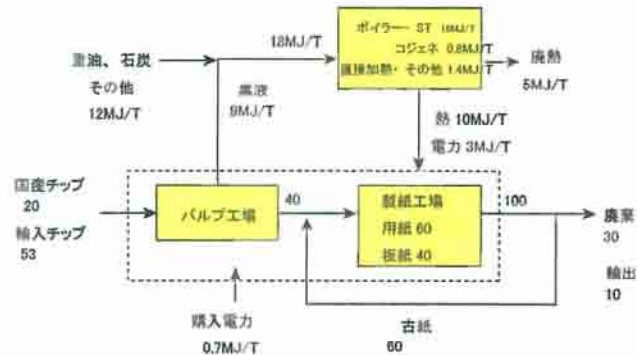


図 3.4-1 紙・パ産業における現状のエネルギーバランス

(2) 2100年の想定される姿

紙・パルプ産業は、現状でもバイオマスを原料とし、また、廃棄された紙の循環利用が進んでいる。将来はエネルギーの不足分として、現在投入している化石系エネルギー供給をゼロとし、さらに他の産業にもエネルギーが供給できる姿を想定している。黒液の他に、廃棄物系バイオマスおよび木質系バイオマスを加えてガス化し、高効率なバイオマス IGCC/IGFC を適用することにより、外部から燃料を投入することなく、業界外へ電力を供給できる。

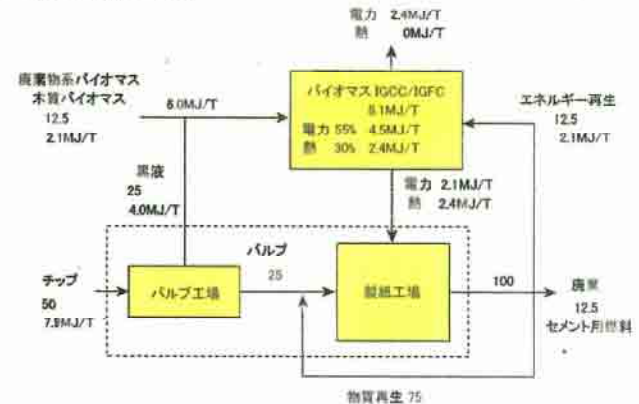


図 3.4-2 エネルギー産業と連携・融合した紙・パ産業

(3) エネルギー産業と連携・融合した紙・パ産業

2100年には、生産量は他の製造製品と同様に1.6倍となり、再資源化率は75%まで引き上げられる。再資源化率が上昇するとパルプ繊維は短くなりペーパーズラッジとして排出され、燃料としてエネルギー再生用に利用される。無機分が多いスラッジはセメント燃料となる。

黒液を燃料として生産工程に必要な熱・電力をIGCC/IGFCによって発生させているが、黒液だけのエネルギー供給だけではエネルギー需要を賅いきれないので、新たにバイオマス燃料を2.1 MJ/t投入している。

また生産工程に必要な熱をIGCC/IGFCによって発生させるとした場合、製品2.4 MJ/tの電力が余剰となり、他産業等へ供給することが可能となるので、紙・パ産業はエネルギー転換産業の役割も果たすことができる。