

「脱炭素社会」における エネルギー需給構造 についての一考察

奥村 和夫

(一般財団法人 省エネルギーセンター 専務理事)

昨年 10 月、菅総理が所信表明演説において 2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする「カーボンニュートラル」を目指す旨を宣言され、我が国としてこの目標に不退転の決意で挑戦することが示されました。また、昨年 12 月には、経済と環境の好循環を形成するための「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」(以下「グリーン戦略」という。)が産業政策として打ち出されました。

このように「カーボンニュートラル」に対する機運は、著しく高まっておりますが、一方においてこの目標の達成は、極めて難しいとされています。そこで本稿では、私の携わる「省エネ推進」の守備範囲をかなり越えることとなりますが、私なりに「カーボンニュートラル」が実現した「脱炭素社会」におけるエネルギーの需給構造はどうなるのか、その実現はなぜ難しいのか、実現のためにはどのような課題をどのように克服していく必要があるのか等を整理してみることとしました。

1. 脱炭素社会におけるエネルギー供給構成

- (1) 周知のように経済社会活動においてエネルギーは不可欠であり、現在一次エネルギー・ベースでは、石油、石炭、天然ガス等の「化石燃料」と、再エネ、水力、地熱、原子力といった「非化石エネルギー」から供給されています。このうち、化石燃料は、通常酸化の過程で発生した熱を利用しますが、この際に CO₂ を発生します。
- (2) 一方、「脱炭素社会」では、地球温暖化の主要因となっている CO₂ の大気への放出を収支上ゼロ以下とする必要があります。すなわち、森林や海洋等による CO₂ 吸収の範囲内でしか経済社会活動において CO₂ を大気に放出できないということです。
- (3) したがって、大雑把に言えば「脱炭素社会」においては、化石燃料を燃焼させて CO₂ の発生を放置したまま利用することは原則できないと考える必要があります。

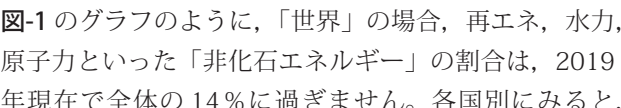
換言すれば、一次エネルギー・ベースでは、「非化石エネルギー」のほかは、CO₂ の大気放出を回避しつつ化石燃料を使用する「脱炭素エネルギー」の形態でしか原則利用できないということです。この「脱炭素エネルギー」は、化石燃料の燃焼時に CO₂ を除去することにより得られ、除去された CO₂ は地中貯留や化学品への変換等により固定化され、大気中に放出されないよう処理されます^(注)。

(注) ここで言う「脱炭素エネルギー」は、自然に存在する化石燃料を加工・変換したもので、厳密には一次エネルギーとは言えませんが、本稿では便宜一次エネルギーと同等のエネルギー供給形態として取り扱います。

- (4) また、「脱炭素」の議論では水素がよく話題となりますが、水素は一次エネルギーではありません。一次エネルギーから得た電気による水の電気分解や一次エネルギーである天然ガスの改質等を通じて転換・生成される、いわゆる 2 次エネルギー(電気分解の場合は 3 次エネルギーというかもしれませんが)です。したがって、水素或いはその化合物のアンモニア等は、それ自身で一次エネルギーを増やすものではありませんが、後述のようにエネルギーの貯蔵や輸送等において機能を発揮します。

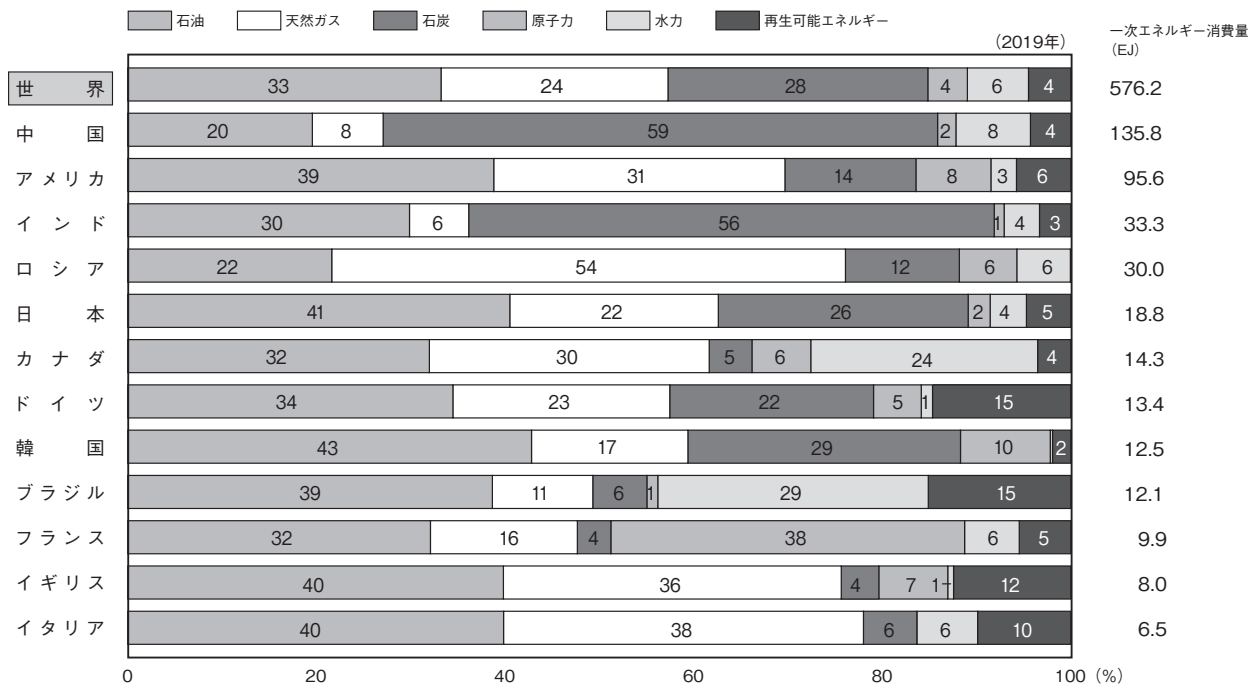
ただし、脱炭素社会においては、水素等も「非化石エネルギー」又は「脱炭素エネルギー」から転換・生成される必要があります。

2. 「脱炭素社会」実現の困難性

- (1) 「脱炭素社会」の実現の難しさは、まず各国における現在の一次エネルギー構成をみれば明らかとなります。

エネルギー源	割合 (%)
化石燃料 (石炭、石油、天然ガス)	約 80%
水力	約 7%
原子力	約 10%
非化石エネルギー (風力、太陽光等)	約 3%

図-1 のグラフのように、「世界」の場合、再エネ、水力、原子力といった「非化石エネルギー」の割合は、2019 年現在で全体の 14% に過ぎません。各国別にみると、原子力の割合が多いフランスで 49%、水力や再エネに恵まれたブラジルで 45%、水力が豊富なカナダで 34%



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある
 1EJ(=10¹⁸J) は原油約2,580万kℓの熱量に相当 (EJ: エクサジュール)
 出典: 原子力エネルギー図面集 (日本原子力文化財団)

図-1 主要国の一次エネルギー構成

となっていますが、再エネ電源の導入が進んでいるドイツやイギリスでも20%程度です。日本は11%と先進国の中でも特に低い割合となっています。

- (2) 「脱炭素社会」においては、再エネや原子力といった「非化石エネルギー」或いは現在ほぼ実用化されていない「脱炭素エネルギー」を大幅に拡大し、これらで供給を原則100%にする必要があります^(注1)。すなわち、今後「世界」については86%分を、日本においては89%分をこれらのエネルギーで埋めていかねばなりません。

なお、国外からこれらエネルギーを調達するという考え方はありますが、非化石エネルギーについて国内供給量が需要量を上回り輸出余力がある国は、現在のところこのグラフにないノルウェー^(注2)等しかなく、また陸続きでない場合には、後述するように水素等の形態で調達する必要がありますので、ハードルはとても高いと言えます。

(注1) 厳密には森林等で吸収されるCO₂に対応する化石燃料分の利用は許容されますが、本稿ではこの分を除いて検討を進めます。

(注2) 2016年における同国のエネルギー自給率（一次エネルギーのうち自国内で確保できる比率）は743%もあり、また一次エネルギーのうち、非化石エネルギーが45%（再エネ2%、水力43%）を占めているので、数字上非化石エネルギーの輸出余力があると

みなせます。

(出典: 諸外国のエネルギー政策動向に関する調査報告書 2018年2月 日本エネルギー研究所)

3. 日本についてのシミュレーション

- (1) それでは、日本において脱炭素社会を実現するためには、どのようなエネルギー需給構造を目指したらよいのでしょうか。概念的には別添のフロー図（56p 参照）のようになると思います。その意味するところは、繰り返しになりますが一次エネルギーの段階で「非化石エネルギー」と「脱炭素エネルギー」をエネルギー需要に見合うよう確保するということにほぼ尽きます。しかし、これにはエネルギー源毎にみても次のような難しい課題があります。

1) 再生可能エネルギー等

「非化石エネルギー」のうち再エネについては、国内において普及が進みつつありますが、2019年では全体の5%程度です。化石燃料に比べ総じて割高であり、また太陽光や風力は、気象等による変動が大きいといった課題もあり、蓄電・蓄熱の技術が重要となります。水力

の割合は、全体の4%程度で、バイオマス、地熱とともに資源上の制約があります。

2) 原子力発電

「非化石エネルギー」のうち原子力発電は、広く実用化された技術であり、大震災における福島第一発電所の事故以降、稼働が低調に推移していますが、安定的な供給が期待できる技術です。一次エネルギー供給割合も現在2%程度ですが、1998年には15%近くまでなったことはあります。したがって、今後は何よりも安全性の確保が重要となります。

3) 脱炭素エネルギー

現在、一次エネルギーの89%を占める「化石燃料」を活用するためには、国内又は海外で脱炭素化する必要があります。しかし、この「脱炭素エネルギー」は、現時点では供給量がないに等しい状況ですので、どこまでCCUS（二酸化炭素回収・有効利用・貯留技術）を実用化できるかが最大の課題です。すなわち、CO₂固定化のためには、これを地中に注入して圧力により液化又は固化する方法や化学品等に変換して液体又は固体として利用する方法等があるので、この実用化・普及が期待されるわけです。

ただし、国内においては、CO₂の地中貯留が適地の確保等の観点から難しいと考えられることから、化学品等（ポリカーボネート、ポリウレタン、セメント・コンク

リート等）へ転換して有効利用するという観点がとても重要になります。

4) 海外からの調達

これも現時点の供給量はほぼゼロであるものの、「非化石エネルギー」又は3)の「脱炭素エネルギー」を輸入するという方法も考えられます。この場合、調達先は海外となりますが、これらエネルギーは、各国の脱炭素対応において優先的に利用される可能性の高いエネルギーであり、海外から量的にどの程度を安定的に確保できるか課題となります。また、化石燃料由来の「脱炭素エネルギー」を調達する場合は、3)のCO₂の固定化を行う能力がある国を調達先とする必要があります。

さらに、島国である我が国の場合、海外からはこれらエネルギーを電気や熱のままの形で調達することは困難なので、水素等のエネルギー媒体に転換して輸送してこなければなりません。この場合には、後述するように転換、貯蔵、輸送等のプロセスや受入れインフラの整備等が必要となるため、技術的課題に加え、その分のエネルギーや費用が加わることになります。

(2) 以上を前提として、机上の計算とはなりますが、我が国において脱炭素社会が達成されると仮定した場合のエネルギー需給構造（一次エネルギー・ベース）をイメージしてみましょう（図-2 参照）。

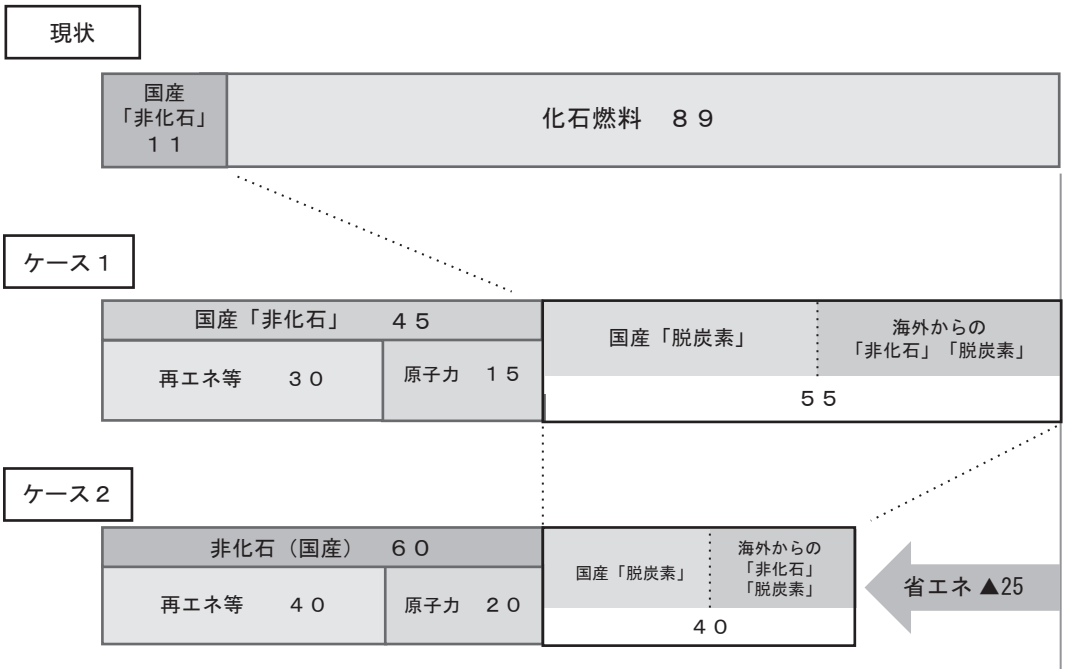


図-2 エネルギー需給構造（1次エネルギーベース、数値は総供給量に対する%）

ケース1

- ①まず、エネルギー需要に見合った供給量は現状（2019年）と同水準とします。
- ②国産の再エネ、水力等の自然エネルギーについては、電力全体に占めるその割合が現在約20%ですが、「グリーン戦略」では2050年にこれが約3倍の約50～60%程度まで増えることが期待されています^(注)。そこで、ここでは一次エネルギー・ベースで再エネ・水力等の全体に占める割合が現在の約10%から3倍の30%まで増加できると仮定します。
- (注) 同戦略では、水力等を含めて「再エネ」と称しています。
- ③原子力については、過去の最大値を踏まえ、15%まで拡大できるとします。
- ④その結果、国産の「非化石エネルギー」で45%まで調達できることとなりますが、残りの55%については国産の「脱炭素エネルギー」^(注)と、海外からの「非化石」及び「脱炭素」エネルギー（この場合は水素等に転換して輸送）で賄わなければいけないということになります。
- (注) ただし、この国産の「脱炭素エネルギー」は、ほとんどが輸入された化石燃料をもとに生成されます。

ケース2

- ①次にエネルギー需要量が省エネにより、（ケース1）の4分の3になったとします。また、再エネ・水力等と原子力の調達量は（ケース1）と同じとします。
- ②この場合には、一次エネルギーに占める割合は、国産の再エネ・水力等が40%、原子力が20%となります。
- ③その結果、国産の「非化石エネルギー」は60%まで拡大するので、国産の「脱炭素 エネルギー」と、海外からの「化石」及び「脱炭素」エネルギーで補填しなければならない割合が40%まで減少します。
- (3) (2)からもわかるように、我が国において「脱炭素社会」を成立させるためには、国内において再エネ等や原子力を可能な限り拡大した上で、現在は実用化されていない国産の「脱炭素エネルギー」と、海外からの水素等の形態による「非化石」及び「脱炭素」エネルギーを相当量調達しなければなりません。

また、これらの難易度は省エネを徹底することにより大幅に軽減できる可能性があります。

4. 水素等の利用に係る課題

- (1) 上述のように「非化石」又は「脱炭素」エネルギーを水素に転換することにより、これらを海外から船で輸

送することができます。また、水素は、同様の2次エネルギーである「電気」とは異なる利用方法があります。例えばCO₂を出さない燃料として燃料電池車だけでなく、将来船や飛行機で利用できるかもしれません。水素還元製鉄が実用化された場合には大量の水素が不可欠です。水素やアンモニアは燃焼により発電に利用することも可能です。また、余剰電力を水素に転換し、蓄エネルギーとすることもできます。

- (2) 「脱炭素社会」においては、例えば太陽光エネルギーや風力からの電気で水を電気分解して水素を得られます。また、天然ガスの改質により水素を生成し、発生したCO₂を固定化することにより脱炭素化できます。ただこの場合には太陽光、風力から得られる電力や天然ガスの熱をそのまま使うより、電気分解やCO₂固定化等のステップが多くなるため、エネルギーや費用を余分に必要とします。

また、水素を海外から船で輸送する場合には、水素の体積を縮減するため、気体をマイナス253度以下に冷却し、液化することが求められます。水素は分子が小さく漏洩しやすいので配管等の密閉度を溶接等により高める必要があります。現行の燃料電池車では、必要な走行距離を得るため、極めて高圧の700気圧に圧縮した水素を強靱なタンクに入れてあります。

- (3) 水素の化合物であるアンモニアの場合は、貯蔵・輸送に伴うハードルは水素ほど高くなりませんが、エネルギー転換の過程では、水素と、空気から固定して得られた窒素を化合するというステップが加わります。また、メタンやシクロヘキサンを水素の貯蔵・輸送に使い、それらに含まれるカーボンがリサイクルするという考え方も有望ですが、水素をそのまま利用するよりは、ステップが多くなります。

- (4) 2050年を見据えた水素等の利用については、政府の「水素基本戦略」（2017年12月）に基づき、現在総合的な対応が進められており、これにより上記のような水素等の製造・貯蔵・輸送・利用に係る様々な技術的、経済的課題が克服されることが期待されます。ただ、同戦略でも水素の国際サプライチェーンの構築が目標とされていますが、「脱炭素社会」形成のためには、水素等の供給源ともなる「非化石」又は「脱炭素」エネルギーを国内外で具体的にどうやって十分確保するかということを特に意識していく必要があると思料します。

5. 対応の視点

以上を踏まえ、「脱炭素社会」を我が国で実現するとい

う極めて難しい目標へ効果的にアプローチするためには、次の点を考慮することが重要と考えます。

1) 再エネ・原子力発電の最大限拡大

国内で「非化石エネルギー」を最大限拡大するため、再エネ等及び安全確保を前提に原子力発電を増強することが必要です。再エネについては、太陽光等の効率向上、洋上風力の拡大、電力系統の強化、蓄電・蓄熱の性能向上等を抜本的に進めることが求められます。水力や地熱についても新たな資源開発により可能な限り供給量拡大を図る必要があります。

原子力発電については、既存の軽水炉の安全・安定操業に加え、安全性の高い小型モジュール炉や高温ガス炉等の開発・実用化を図っていくことが重要です。特に高温ガス炉はカーボンフリー水素製造にも利用することが可能であり、期待が持てます。

2) 「CO₂の固定化」化学の確立等による CCUS の革新

国内で「脱炭素エネルギー」を増大させるためには、CO₂の固定化を一般化する必要があります、このためにはCCUSの実用化・普及が前提となります。特に我が国においては、前述のようにCO₂を化学品等へ変換する有効利用技術の実用化がポイント^(注)であり、体系的な「CO₂の固定化」化学の確立を目指して、これに取り組むべきと考えます。これにより、例えば発電所や製鉄所など現在CO₂発生量の多い施設において、オンサイトでCO₂固定化を行うシステムが形成できれば脱炭素化が大幅に進みます。また、この分野が国際競争力を持つテクノロジーとして成長することも期待できます。

(注) 参考：「エネルギー・環境分野における有望技術の技術課題に関する包括的調査」(2018年3月、(株)東レリサーチセンター)

3) 海外等からの水素等の確保と有効利用

まずは「水素基本戦略」に沿って、水素等の供給源である「非化石」及び「脱炭素」エネルギーを主に海外において具体的に確保するとともに、水素等の製造・貯蔵・輸送・利用に係る技術的・経済的課題を克服していくことが求められます。

特に「非化石」及び「脱炭素」エネルギーの海外での確保については、これらがどの国の脱炭素対応においても不可欠なエネルギーとなることから、水素等の調達先で再エネ開発やCCUS実用化への投資・技術提携を積極的に行う等により、我が国のバーゲニング・パワーを戦略的に強化することが重要です。

また、国内でつくられる「非化石」及び「脱炭素」エネルギーは、できれば水素等に転換せず、電気又は熱としてそのまま利用の方が効率的ということもあり、水素等の用途については合理的な選択を行うことが肝要です。

4) 省エネの徹底等

脱炭素社会におけるエネルギー需要については、3.(2)のシミュレーションからも明らかのように、ただでさえ確保が難しい「非化石」及び「脱炭素」エネルギーの供給ニーズを軽減する上で徹底的な省エネが不可欠です。また、化石エネルギーを使用する現在のエネルギー形態に比べ、CO₂の固定化や水素利用等に余分のエネルギーを要する可能性が高く、その意味でも省エネはますます重要となります。

このためには、省エネ革新技術を追求するとともに、その時々を経済社会の技術や活動様式に即した着実な省エネを積み上げていくことが求められます^(注)。加えて、CO₂の固定化や水素利用等に伴うエネルギーをできるだけ削減する必要があります。

(注) 参考：拙著「今後の省エネについての一試論」月刊「省エネルギー」2020年5月号

また、エネルギー需要削減の観点からは、大量に消費されている金属等のリサイクルの強化も重要です。例えば、鉄をリサイクルすればエネルギーは鉄鉱石から製造する場合の約1/3、アルミニウムは新たに地金を製造する場合の約1/30で済むといわれており、効果が期待できます。

更に、最近では脱炭素に向けた企業行動として、ESG^(注1)やRE100^(注2)といった観点から、利用するエネルギーの再エネへの転換等を進める活動に取り組む企業が増えています。このような活動は、一次エネルギー・ベースでの「非化石」及び「脱炭素」エネルギーの供給を直接的に増加する効果は大きくないかもしれませんが、これらエネルギーの価値を高め、関連投資の促進等を通じて間接的にその供給を拡大する効果を持ちます。

(注1) ESGは、企業の経営や成長において、環境・社会・ガバナンスという3つの観点の配慮が必要という考え方です。

(注2) RE100は、企業が自らの事業の使用電力を100%再エネで賄うことを目指す国際的イニシアティブです

5) 「電化」の促進

エネルギー需要形態としては、電化を進めるのが効果的です。何となれば、脱炭素社会においては、燃焼の場合に化石燃料を使用できず水素、アンモニア等を使うこととなりますが、これらには3)のような制約があるので、「非

化石エネルギー」又は「脱炭素エネルギー」を転換した電力を、ヒートポンプや電気自動車等を介して利用する方が有利となるケースが多くなるからです。

また、国産の「非化石エネルギー」（再エネ・水力・原子力等）のほとんどは、「電気」の形態で生成されるので、その拡大は利用段階における「電化」の傾向を後押しします。その意味でも電気自動車等の利用拡大は合理的となります。

6. まとめ

(1) 以上、「脱炭素社会」ではどのようなエネルギー需給構造が求められるか、またその実現に向けた対応の方向性はどうかといった点を検討してきました。改めて、これを若干シナリオ的に整理・要約すると次のようになります。

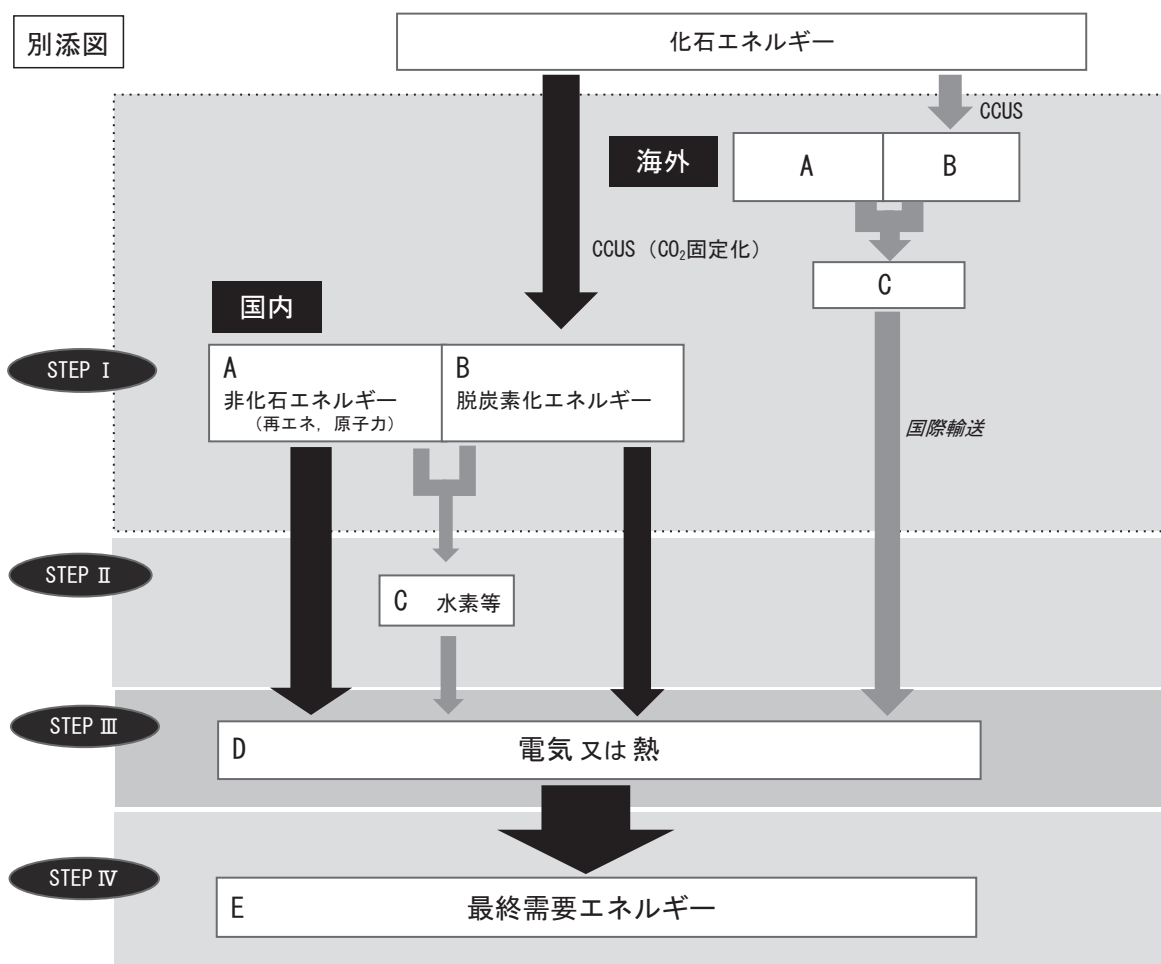
- ①我が国において「脱炭素社会」を実現するためには、再三述べているように一次エネルギー・ベースで国内需要に見合った「非化石」及び「脱炭素」エネルギーを国内で或いは海外から確保することが大前提です。
- ②これらエネルギーは可能な限り国内で調達できるのが望ましいですが、そのためには、まずは既に実用化が進んでいる再エネ、水力等及び原子力発電を最大限拡大する必要があります。
- ③併せて、主に海外から輸入される化石燃料を国内で「脱炭素エネルギー」として利用するため、「CO₂ 固定化」化学の確立等を目指して CCUS の実用化に挑戦すべきと考えます。
- ④そのうえで、これらエネルギーの国内での確保が不十

分な部分については、海外から水素等を媒体として調達することが求められます。このため、現在推進中の「水素基本戦略」に沿って、これらエネルギーの海外での確保と水素等の国内での利用に至る技術的・経済的障害の克服を図っていく必要があります。

⑤他方、「非化石」及び「脱炭素」エネルギーの確保にかかる負担を軽減するため、需要面で省エネの徹底等を並行して進めることが不可欠です。加えてこれらエネルギーを効率的に利用するため、電化を図ることも重要です。

(2) しかし、上にあげた②から⑤の課題の達成は明らかにどれも容易ではありません。必要な対応の多くはこれまで経験したことのないものであり、いずれも技術的、経済的な壁をブレークスルーしていくことが求められます。国家間の利害調整、産業構造の転換、公的な理解、他の経済・社会問題との調整などが必要となる場合も多くあります。したがって、我が国社会が一丸となってこの課題に臨まない限り、活路は見出せません。

加えて「脱炭素社会」の成立を目指すには、2050 年までの 30 年間は決して十分な期間とは言えません。総花的でなく戦略的な対応が不可欠です。このために重要なのは、「非化石」及び「脱炭素」エネルギーの確保、省エネの徹底にねらいを定め、その実現のために必須となるプロセスを明確化することです。その上で、実効性が高い取り組みを強力に推進し、目に見える成果を追求していく必要があると思料します。



別添図 脱炭素社会におけるエネルギーフロー（概念図）

（概念図の見方）

- ① I のステップは、国内へ供給可能な炭素を含まないエネルギー源を表す。具体的には、国内外でつくられる非化石エネルギー（再エネ、原子力発電）と化石エネルギーから CO₂ を固定化して脱炭素化したエネルギーを表す。
ただし、海外からこれらを調達する場合は、水素等（アンモニア等の化合物を含む）の形に転換して輸送する必要がある。
- ② II のステップは、I のうち国内で水素等に転換されたエネルギーを表す。
- ③ III. のステップは、I 及び II からの電気又は熱への転換を表す。
- ④ IV. のステップは、最終需要として利用されるエネルギーを表す。

（留意すべき事項）

- ア、脱炭素社会で使えるエネルギー源は、I のエネルギーに限られる。
- イ、脱炭素社会で使える水素等は、非化石エネルギー及び脱炭素エネルギーを転換したものに限られる。（この水素等は「非化石」及び「脱炭素」エネルギーの一部が形態変化したものである。）
- ウ、CO₂ の固定化、水素等への転換には別途のエネルギー（例えば電気分解等）を要する。また、海外からの水素等については、調達に伴う液化等のエネルギーが必要となる。