

2050年におけるエネルギー需給の再評価（邦訳）

著者 フランス石油専門家協会会長（1999-2000）

フランスエネルギー研究所副所長

トタル・フィナ・エルフ会長特別顧問

ピエール・ルネ ボキ

コメント 常務理事 首席研究員 藤目和哉

訳 計量分析部計量分析グループマネージャー 奥村憲博

コメント

今後エネルギー需給・価格見通しについて、日本エネルギー経済研究所の見通しを短・中・長期あるいは超長期について定期的に発表すると同時に他機関のそれらも積極的に紹介していく方針である。

今回紹介する見通しは2050年までの世界エネルギー需給であるから超長期である。見通し期間が長くなれば当然不確実性が大きくなり、エネルギー需給の枠組みとなる人口、経済成長、技術進歩、環境規制などの想定の方によって大幅に変わってくる。たとえどんな精緻な数学的モデルを使っても、外生値として与える基本的な前提は主観的判断に頼らざるを得ない。従って短・中・長期見通しにおいて使う予測という言葉は超長期ではむしろシナリオと置き換えた方が適切かもしれない。誰も50年後の状況を当てるつもりで予測するわけではなく、50年後のエネルギー需給の姿を考えるあるいは想像するに当たって必要不可欠な要素の組み合わせを提示することを主目的としているとあってよいだろう。

2050～2100年についての世界のエネルギー需給のシナリオについては日本エネルギー経済研究所計量分析部が作成したもの（本ホームページ研究レポートの「需給価格見通し」）があり、IIASA（国際応用システム研究所）が数年前に発表したものがある。また今後紹介するものとしては、シエルの「Energy Needs, Choices and Possibilities - Scenario to 2050」等がある。それぞれ特徴をもっているが、今回の見通しは石油系化石燃料の資源量をかなり大きめに見てそれでも資源枯渇性や環境制約によって原子力が復活するといういかにもフランス的というか在来型エネルギーが2050年になっても依然として相当のウェイトを占めるという意味ではコンサパティブな見方をしているとあっていいだろう。しかし、それでも2050年には現在世界の一次エネルギー供給の85%を占めている化石燃料は66%近くまで比率を落とすことになると見ている。原子力から作った水素エネルギーの普及が石油産業や自動車産業に大きく資することが期待されている。

このレポートは図表が大きな比重を占めているが、和文の方でもそれらは原文のままとしている。時間と費用を考えた上での措置であるがご容赦頂きたい。

英語の原文「A reappraisal of energy supply and demand in 2050」は、当研究所

ホームページEnglish の項 , Outlook/Forecast のOutlook/Forecast by Other Organizations に全文そのまま掲載してあるので参照されたい。

2050 年におけるエネルギー需給の再評価

Pierre-René Bauquis^(*)

フランス石油専門家協会会長 (1999-2000)

フランスエネルギー研究所副所長

トタル・フィナ・エルフ会長特別顧問

序論^(**)

最近、多くの異なったエネルギーシナリオが提案されてはいるが、ほとんどの産業アナリストたちは、世界のエネルギー最終需要は、2030 年までに 9Gtoe (石油換算 10 億トン) から 18Gtoe へと約 2 倍に、2050 年までには 25~30Gtoe へと約 3 倍に増大すると予測している。これらの予測によると、現在世界の消費エネルギーの 85%を占めている化石燃料のシェアは、2050 年までに 3 分の 2 を超えなくなる。

この論文の目的は、今後半世紀のエネルギー予測の基礎となる前提及び 2050 年における世界エネルギー需給の再評価を行うことである。これは無駄なことのように見えるかもしれない、というのも、例えば、2010 年とか 2020 年以降の技術革新や経済的または人口の大きな変動の結果を予測することは不可能なことだからである。さらに、人類が基本的な社会的選択を決定するためにより合理的な基準を取り入れるのか、又は現在の多様な基準に基づく非合理的な

パターンが優勢でありつづけるのかについては、エネルギー需給予測のためには恐らく、最も重要な未知のファクターであるのだが、知りようがない。この要素は世界のエネルギーの将来に大きな影響を及ぼすのであるが、予測することは出来ない。重要なことは科学者によって定義される現実ではなく、人々が何を認め何を欲しているかである。これはまさしく民主主義のエッセンスであり、それゆえに、様々なエネルギー源の将来を左右する重要なファクターである。持続可能な開発や現在進行中の環境問題に関する議論は、我々の認識及び願望に左右されるし、それ故に将来のエネルギーの方向性を見出す際に重要な役割を担う。我々が地球温暖化、原子力及び個々の輸送手段の利用に伴うリスクを受け入れるか否かは、今後の 50 年間におけるエネルギー消費に影響を及ぼす。同様に遺伝子工学に伴うリスクを受け入れるか否かが、これからの 50 年以上に渡って土地を食料用に利用するかエネルギー用バイオマスに利用する

かという問題に関する我々の対応を決定することになる。

以上に含まれる問題は多種多様であるが、この論文は、経済成長、人口動態、天然資源及び特に化石燃料（石油、ガス及び石炭）の利用、再生可能エネルギーの展望及び原子力問題の主要なパラメーターを大まかに再評価することに限定する。この論文の目的は、既存のエネルギー需給の見通しより正確なものになるかどうかは判らないが、データを新たに見直し、2050 年に向けた新たなエネルギー需給を見通すことである。通例とは異なり、ここでは様々なシナリオを提示するのではなく、今日我々が考えている最もありそうな将来の進路を展望するものである。

1. 経済成長

GNP で計測される経済成長とエネルギー消費は過去 20 年以上に渡って、部分的に異なる動きを示してきた。この現象は、一部は経済の“脱物質化”すなわち“ソフト化”、そして一部は省エネの影響を受けたものである。省エネは産業の各種プロセスにおけるエネルギー効率向上と光熱、エアコン、家電及び輸送（自動車・航空機エンジン等）のエネルギー効率向上によってもたらされた。ただし、ここにはもう一つ、逆のファクターも影響している。それは GNP が増大すれば、それにともなって輸送及び快適性に対するニーズが高まることである。このことは“TV で見られる”西洋の消費社会の生活スタイルを社会全体として切望し、急速に経済成長を遂げている国々に特にあてはまる。あいにくこれらの国々は、正に今後の 50 年間に経済成長及び人口増大の太

宗を占める国々である。

“よりよい”生活スタイルへの願望は、極端なエコロジー運動、新しい倫理観運動及び主要な宗教の教義の再解釈といった観念的な要因でやがては抑制されるかもしれないが、これらの抑制は、増大する地球規模の情報交換によってもたらされる社会欲求には、軽微な影響しか与えそうもない。しかしながら、これらの見解は、2020 年以降についてはどの程度まであてはまるのであろうか。はっきり言って我々にはそれは判らないし、分からない事が長期予測を困難にしている主要な原因の一つなのである。我々は洗練された数学モデルによって既存のトレンドから将来を推定する方法については知っているものの、これまでの行動パターンに大きな変化が生じると、そのようなモデルは意味をなさなくなる。

2. 今後の人口動態

50 年前にイタリア及びスペインの女性にはドイツやスウェーデン女性の 2 ~ 3 倍の子供がいたものの、今日、彼女達の娘の世代では逆にイタリアやスペイン女性の方が明らかに出産数が少なくなっているということは周知の事実である。移民のみが現在、これら二つのラテン国の人口水準を安定的に保つことを可能にしている。

この種の行動パターンの変化は最近、チュニジア、モロッコ、トルコ及びエジプトのような他の地中海沿岸国で認められるようになってきおり、同様の変化が今、アルジェリアで非常にはっきりと起っている。この傾向が今後加速し、他の出生率の高い国々に及んでいかないという理由はない。（図 1 参照）人口成長に影響を及ぼす主要

因は、“子供を産みたい”とする欲求という非常に神秘的な現象である。この欲求には強い文化的側面があり、文化的モデルが急激な変化を被るとき、宗教的思考方に急激な変化が起きない場合でさえ出生率は急速に変化し得る。文化的モデルは情報のグローバル化に強く影響されている。今や、人工衛星によって、北米及びヨーロッパの規範に強く影響を受けた「理想的家族」のイメージは、最も人里離れた村まで伝えられる。テレビによって伝えられてきた規範は、次の 20～30 年間はインターネットを通じて、さらなる文化の西欧化によって強化されていくであろう。太陽光発電のさらなる開発によっては、2020 年以前にも、一般のトアレグ人のテントやモンゴル人のユルトで衛星テレビ、携帯電話及びインターネットアクセスを持つことになるかもしれない。

人口はまさに長期世界エネルギー需要の中心課題であるが故に、明確なスタンスが必要である。先に概括した要因をベースにすると 2050 年までに人口は、通常予測されている 100 億人 (+/-10 億) ではなく、80 億人 (+/-20 億) になりそうである。このことは、我々の考えでは 2050 年の人口は 100 億人に到達するというよりは、現在の 60 億レベルに戻ってきそうであることを意味する。

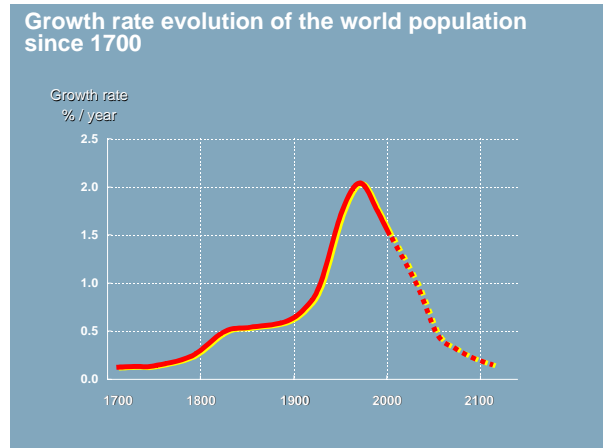


Figure 1 - Growth rate evolution of the world population

3. 化石燃料資源量と可採鉱量への疑問 (* **)

ここでは、エネルギー見通しのこの側面についてある程度詳細に取り扱う。というのも、我々は、様々なエネルギーの将来の供給可能量にかかわる制約条件が、大方の研究では過小評価されていると考えているからである。

“石器時代は石の不足で終焉したのではない”、即ち、炭化水素の時代は石油及びガス資源量の枯渇からではなく、化石燃料の大量使用に関連する環境問題によって終焉するということは当世風である。我々はこの見解を共有しないし、石油及びガス生産量の減少は、主として可採鉱量の枯渇に密接に関係していると信じている。

この化石燃料資源量の問題については、過去 50 年以上に渡って悲観論者と楽観論者が激しい論争を繰り広げてきており(図 2, 3 参照) エネルギー産業の最も議論を呼ぶもののひとつである。1930 年代まで遡るとアナリストたちは世界の石油資源の枯渇が迫っていると予測していたが、ひるが

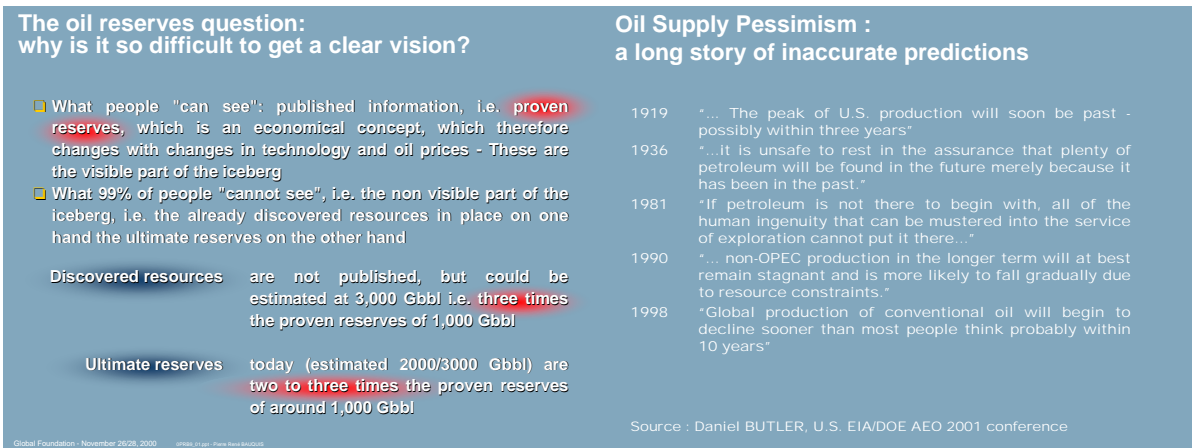


Figure 2 - The oil reserves question: why is it so difficult to get a clear vision?

えって 1999 年までに専門誌は資源がいつ枯渇するか予測しようとする事は全く焦点がずれていると主張するようになった。彼らが議論しているまさに資源の枯渇自体が、資源量の回復をもたらすのである。可採鉱量が減少するにつれ石油価格は上昇し、需要を抑制するに留まらず、既存資源量を可採鉱量に転換する新たな努力への契機ともなるからである。この論争から多くの論点が明らかになる。

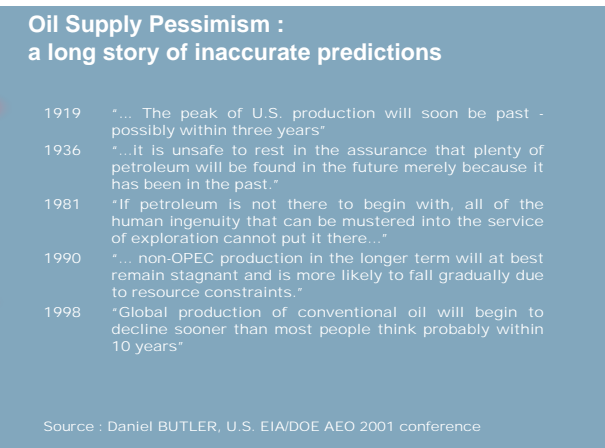


Figure 3 - Oil Supply Pessimism : a long story of inaccurate predictions

化石燃料の可採鉱量（資源量はそこに存在する炭化水素であり、可採鉱量はその中で産業が技術的かつ商業的に生産可能な炭化水素である）を定量化の試みは、存在形態が固体（石炭）、液体（石油）あるいは気体（天然ガス）であろうとなかろうと必要な事であり、大きな問題を孕んでいる。凝縮された太陽エネルギー（化石バイオマス）の有限なストックを、まだ資源段階において（即ちそこに存在すると言うだけの段階では）定量化することは概ね不可能である。特に、

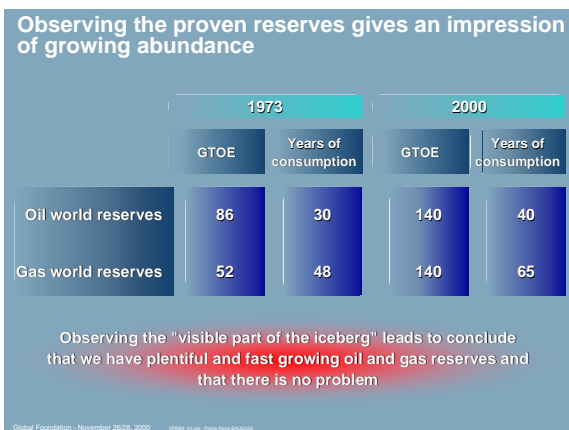


Table 1 - Observing the proven reserves gives an impression of growing abundance

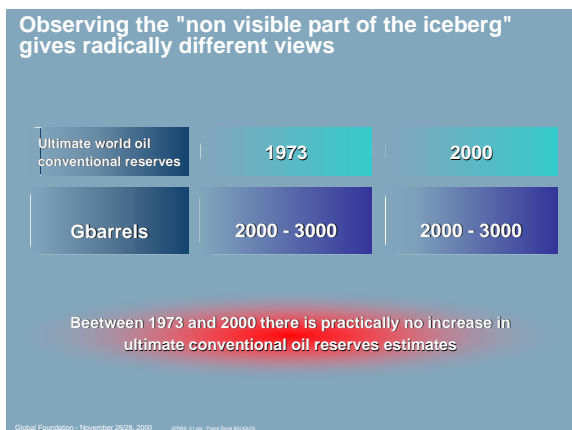


Table 2 - Observing the "non visible part of the iceberg" gives a different view

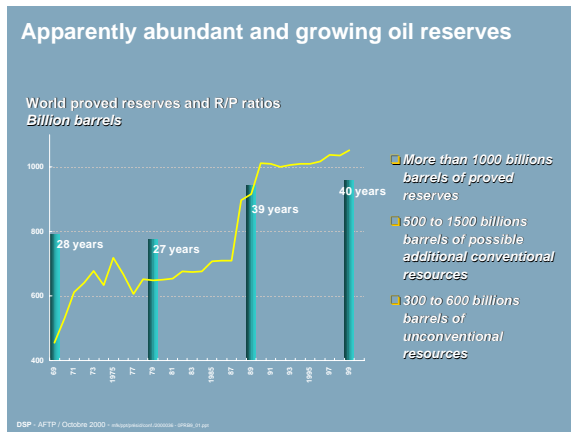


Figure 4 - Apparently abundant and growing oil reserves

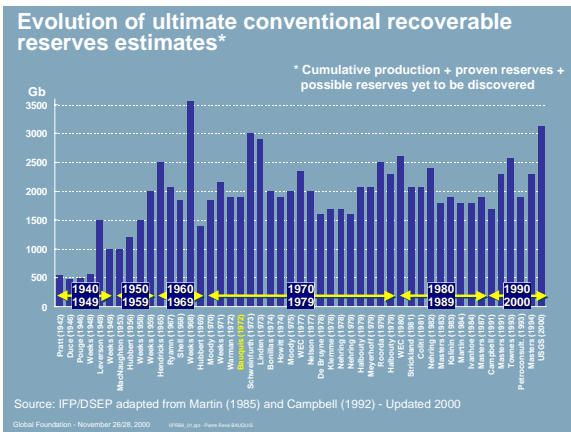


Figure 5 - Evolutions of ultimate conventional recoverable reserves estimates*

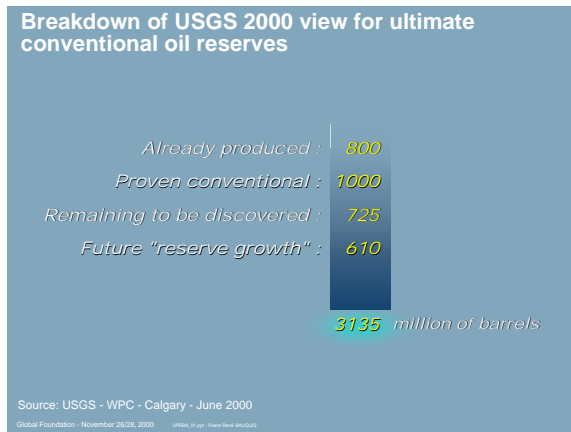


Table 3 - Breakdown of USGS 2000 view for ultimate conventional oil reserves

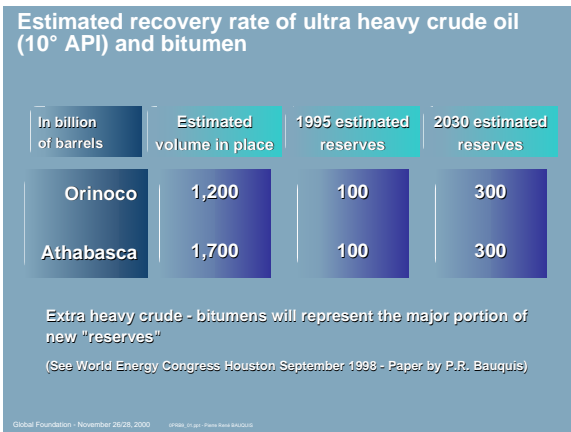


Table 4 - Estimated recovery rate of ultra heavy crude oil

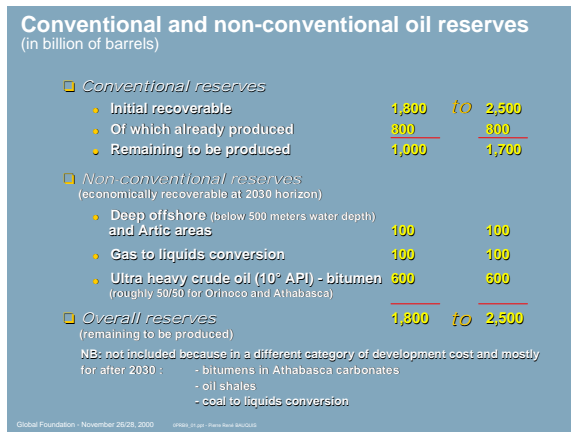


Table 5 - Conventional and non-conventional oil reserves (in billion of barrels)

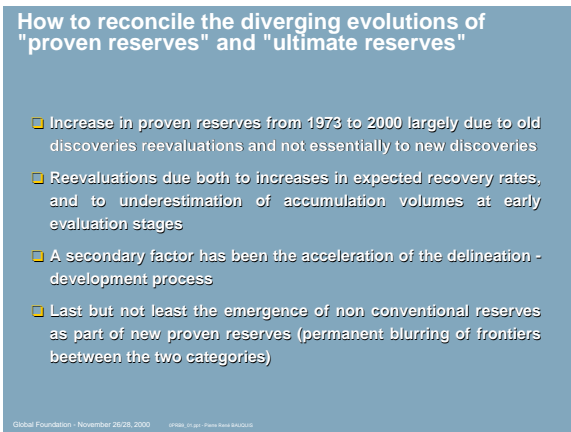


Figure 6 - How to reconcile the diverging evolutions of "proven reserves" and "ultimate reserves"

石炭、褐炭、瀝青質頁岩及びガスハイドレートのような固体のエネルギーの場合に当てはまる。

一方、液体（石油）及びガス体の炭化水素の可採鉱量を定量化する場合の不確実性は、それほど大きくはない。究極資源量、即ちそこに存在するだけの資源量は、石油及びガス体のガス（ハイドレートの場合と異なる）の場合、それぞれ約 30% 及び 50% の誤差で、より正確に評価することが可能である（表 1, 2, 3, 4, 5 及び図 4, 5, 6 参照）。

いわゆる在来型の石油及びガスの可採鉱量の場合、漸減的な可採鉱量の枯渇及び新たな鉱床発見の経過は、事実上 3 つの個別の事柄によって、ここ 20~30 年間おおいかくされてきた。その 3 つの事柄とは、探鉱及び生産のための国際投資に向けた新たな地域の開放、非在来型資源（深海底原油及び超重質原油等）の在来型資源への漸進的転換及び、特に、既に発見されている鉱床に含まれる可採鉱量の再評価である。この最後の事柄は、二つの重要な事実を隠してきた。一つは、いわゆる在来型石油の究極可採資源量の推定量は事実上ここ 30 年間不変であったことであり、一つは、探鉱では、もはや消費される量を補填することはできないことである。この再評価のプロセスには二つの密接に関連した原因がある。原始埋蔵量（すなわち資源量）はその鉱床が発見された当初、しばしば過小評価されたこと、及び、技術の進歩が期待回収率の向上をもたらしたことである。米国内の石油産業を例に見ると、これまでに述べてきた要素が組み合わさって、何故、新規発見がもはや消費の増大に見合うに十分な規模にな

なくなった 1930 年代の終わりから、国内生産量が減少し始めた 1970 年代初め（図 7 参照）まで 30 年間が経過したかが容易に判明する。同じことが世界レベルで繰り返されるであろうと想定する事は合理的に思える。2050 年のエネルギー需給といった長期的観点から状況を見た場合、物理的形態（例：固体、液体及び気体）毎のエネルギー資源

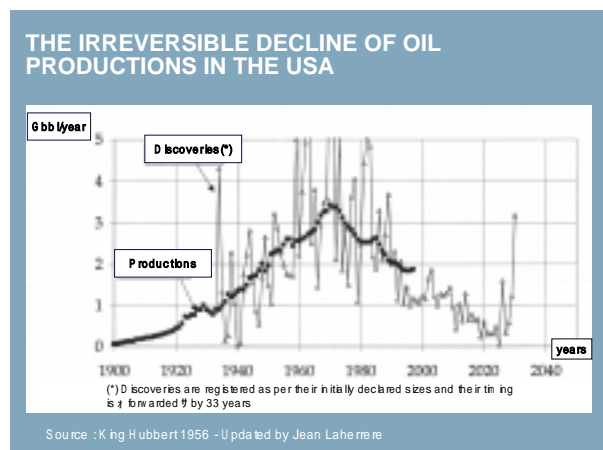


Figure 7 - The irreversible decline of oil productions in the USA

の分類は、適切ではなくなっている。というのも、現在のエネルギー産業は、ある形態からもう一つの形態に変換する技術を持っているからである。石炭及び残渣原油はガス化できるし、また、液体炭化水素は今では、ガスから生産することができる（例：Fischer-Tropsch-type の反応による石油製品への変換、メタノールのオレフィン類への変換）。このことは、エネルギー会社は、今や市場が要求する形態の組合せは何であれ、それらを生産できる一連の化石燃料資源を保有していることを示している。2050 年までには、このような形態別生産は、その時に普及している技術的及び経済的要素に依存しながら様々な方法で導入されるであろう。2050 年のかなり前に、環境保護

というニーズが需給見通しの中の主要な経済的変数の一つとなっていよう。2010 年もしくは 2020 年までには、地球温暖化の危険性についてのコンセンサスが得られるかもしれない。その場合には、各国政府は、炭素の大気への排出に対する責任はコストを伴うものであることを明確にするための行動（環境税及び排出権取引承認等）を取らなければならないであろう。そうすることによって、市場が合理的に炭素排出を規制することを保証することになる。炭素の大気への排出を規制するためにデザインされた“排出者支払”制度の実施は、今日では有望な施策と思われており、石炭のガス化に対しては多少有利なハンディーを与えることになるかもしれない。しかし、このことは、天然ガス又は、固体エネルギー（石炭、タール、バイオマス等）のガス化により生産されたガスが否かに拘わらず、GTL（ガスからの液体油）変換プロセスにかなりの打撃をもたらすであろう。一方、炭素排出の“有償化”は、水素を基本にしたプロセスを優先するエネルギー政策の展開を促すことになるであろう。そのことは、今度は産業界に低コストの二酸化炭素隔離技術の確立を要求することになる。資源量の可採鉱量への転換に関して最も重要な要素は、石油資源とガス資源の区別である。油田からの生産量を評価する際、自然即ち、一次回収量はかなり少なく、重質原油の場合は特に少ない。現在の一次回収量は、重質から軽質までの全ての油種の平均で 30% 未満である。回収率については、特に、比重の極端に大きい、もしくは高粘度の資源の場合、現在開発されつつある技術によって将来、著しく向上し得る。しかし、明確

な質的な違いの無いガスについては、このことはあてはまらない。生産性の悪い限界的なガス層を除けば、ガスの自然回収率は、通常 70~80% 程度とかなり高く、技術によって回収率を高める余地はほとんど残されていない。

石油の自然回収率が低いため、ここに再評価されている 2050 年の需給のような長期予測においては、石油可採鉱量を過少評価する傾向にある。なぜならば、回収率の向上による新たな可採鉱量を過少評価しており、ベネズエラのオリノコ川流域の超重質原油やピチューメンに見られるように、重質原油では特に過少評価している。

同様の理由により、ガス可採鉱量の評価の際には逆のエラーを犯す危険がある。例えばかなり浸透性の低いガス層での水平生産を組み合わせた破砕法のような限られた方法を除けば、技術的には、ガス回収率を上げることによって“新たな可採鉱量を創出”することは難しい。天然ガスの探鉱は石油探鉱ほど進んでいないことから、新しい鉱床の発見によって、可採鉱量はまだ増加しており、今後 10~20 年間は増えつづけるかもしれない。一方、ひとたび年間消費が探鉱によって発見される新たな可採鉱量を上回った場合には、技術の進歩も助けにならず、供給減少をもたらす価格高騰による需要抑制も殆どなく、資源の枯渇は急激で、容赦のないものになるだろう。

ここで、多くの産業アナリスト達が“明日の資源”と見ている固体状態の石油及びガスについて述べてみる。ここでの主要論点は、2050 年までに、エネルギー産業界は、オイルシェールやガスハイドレート資源を有意な量の石油及びガスの可採鉱量に転換

する事が可能になっているか否かである。この研究の目的に照らして、固体化石燃料の可採鉱量の評価に際してはかなり伝統的なアプローチを取ってきており、オイルシェールは固体とみなしたが、油層の条件によって糊のような状態あるいは固化（カナダの Athabasca 鉱床のケース）していても、瀝青質サンドや超重質原油は固体としなかった。この区分は、瀝青質サンドとオイルシェールにはかなりの差異があることから支持される。前者は正真正銘の原油で、移動後、酸化作用及びバイオデグラデーションによって重質化したものである。後者は、実際はケロジェンすなわち“根源岩”であり、有機物が完全に石油に変換されていないため排出及び移動が完了していないものである。タイトガス及びハイドレート資源が、2050 年までにどの程度、可採鉱量に加えられることになるのであろうか。その時でも未だ、これらの資源は、過去数十年に渡ってそうであったように“明日の資源”と見なされているであろう。

4. 再生可能エネルギーの展望

ほとんどの再生可能エネルギーは新しいものではなく、20 世紀後半に新たな技術のおかげで再発見されただけである。この分野は、いまだに開発の初期段階にあり、再生可能エネルギーが次の 50 年に成し得る貢献を正確に評価することは困難である。この再発見の初期段階では、再生可能エネルギーの中には太陽光発電システム、風力及びバイオフィューエルのような、時には年率 20～30% という高い成長を達成しつつあるものもある。しかし、スタートアップ時の成長は持続しないものだし、長期に渡って

この成長率をもって推定すると誤ったものになるかもしれない。

再生可能エネルギーの将来に関して回答が必要とされる、より重要な問題の一つは、再生可能エネルギーの開発を促進するための最も適切な支援に係るものである。この問題を考える際には、いつの時代でも、科学的知見はその開発段階におけるニーズと歩調を合わせて進歩するというを思い起こさなければならない。

再生可能エネルギーについては、今日及び将来に渡って更なる研究が必要である。しかし、研究を効果的に行うには、分散化されるべきであり、研究資金は多くの小規模のチームに供給されなければならない。効率は、再生可能エネルギー研究の大規模ベンチャーや大規模プログラムに研究資金がつかまされたからといって確保されるものではない。実際、短期的には、研究所や私企業から提案されるプログラムへ資金提供するよりは、市場で提示される再生可能エネルギーの価格引き下げに補助金を出すほうが上手くいくであろう。これは、巨額の資金及び集中化した研究開発を必要とした核エネルギー研究に要求されたアプローチとは正反対のものである。

再生可能エネルギー源開発を奨励する上で必要なことは、環境認証制度、グリーン価格、もしくは、再生可能システム（補助対象が厳格に絞られているのであれば選択された再生可能エネルギー）から発電するための同様の手段など、消費者にとって、より経済的社会的に魅力のあるシステムである。

再生可能エネルギー源別の詳細な展望は、これまで他の論文で十分にカバ

Electric power from renewable sources in 1995 and estimation for 2050 *

Source: Revue de l'Energie, 50 ans, n° 509 Sept. 99

	Power installed MW		Electricity generated TWh	
	1995	2050	1995	2050
Hydropower	700.000	1.000.000	2.400	3.000
Wind power	5.000	200.000	10	500
Biomass (for electricity production)	10.000	100.000	50	500
Geothermal	7.000	20.000	30	100
Solar (photovoltaic)	600	30.000	1	100
Solar (thermal)	-	-	10	50
Total	722.600	1.350.000	2.501	4.250

* Energy equivalence used for electricity: nuclear power and renewables have been accounted as if they had been generated by conventional thermal power plants having an efficiency of 40% (as conventionally done by TotalFina)

Global Foundation - November 2028, 2000

Table 6 -Electric power from renewable sources in 1995 and in 2050

一されてきている。ここでは結論として、2050年において発電に使用される全ての再生可能エネルギー源を一覧表にまとめ、これらの予測を最新の値である1995年の実績と比較することで充分であろう。示されているように、表には、2050年までに消費されるであろう再生可能エネルギーの5分の4以上が含まれている。これは、著者の個人的な予測である。紙幅の関係で、この予測の根拠については、ここでは詳述しない。

これら二つの比較から得られる結論は、2050年までに再生可能エネルギー（大規模水力発電の枠組みを除いて）は、エネルギー供給に対しては付随的な役割を果たすに過ぎないであろうということである。大型の補助金制度をもってしても、1995年から2050年にかけては、世界のエネルギー生産に占める再生可能エネルギーのシェアは、多くの他の予測者が想定しているように目に見えて成長するというより、むしろ実際は減少すると見込まれる。

このことは、政府が再生可能エネルギー

開発に対する支援を止めるべきであるということの意味しない。支援は、確かに継続されるべきである。しかし、再生可能エネルギーが、非化石燃料グループである原子力発電に対する信頼できる代替エネルギーと成り得ると想定すべきではない。しかしながら、勿論、再生可能エネルギーが、ここで示されているより急速に進展していくことも考えられる。

遺伝子組み替えによりバイオマスエネルギーの経済性が相当改善されることから、遺伝子工学におけるブレークスルーが進展の引き金になりうる。明らかに、人工葉緑素合成法の開発も、さらに大きな影響を持ち得る。

Electric power from renewable sources in 1995 and estimation for 2050 *

	Electricity generated in TWh		ei in percentage of electricity generated		ei in percentage of overall energy consumptions	
	1995	2050	1995	2050	1995	2050
Electricity consumptions (all origins)	13 000	42 000	2.8	9.0	100%	100%
Hydropower **	2 400	3 000	0.5	0.6	18.0%	7.0%
Other renewables	100	1 250	0.02	0.3	0.8%	3.0%
Total renewables	2 500	4 250	0.52	0.9	18.8%	10.0%
					6.8%	5.0%

* Energy equivalence used for electricity: nuclear power and renewables have been accounted as if they had been generated by conventional thermal power plants having an efficiency of 40% (as conventionally done by TotalFina)

** From which over 95% of large hydropower plants (i.e. plants larger than 10 MW)

Global Foundation - November 2028, 2000

Table 7-The relative importance of Electric power from renewable sources in 1995 and in 2000

5. 原子力エネルギーの未来

ここでの原子力発電の議論においては、単数（energy）及び複数（energies）の両方が原子力産業を記述するのに使用される。章の表題で複数を選択した理由は結論で明らかになる。まず第一に、現状はどうなっているのだろうか。原子力発電は、世界

の発電量の 18%、即ち、全エネルギー消費の 6%を占め、水力発電にほぼ相当する。

今日、世界で使用されている原子力発電プラントは、高速増殖炉型では無く、等しく在来型の核分裂炉型である。使用されているプロセスには異なるタイプがあるが、ここでの議論には関係なく、原子力プラントの大多数は、加圧水型原子炉（PWR）を使用しているといえは十分であろう。これらの原子力プラントは、在来型燃料（3.5%ウラン²³⁵）を使用するかプルトニウム及び酸化ウランを含む MOX 燃料を使用するかに関わらず、濃縮ウランサイクルを用いている。これらのプロセスは、安全で信頼性も高いとされている。これまでに、原子力発電所が関係した大事故が一件だけ - 旧ソビエト連邦のチェルノブイリ - 発生した。この事故は、原子力業界では、原子力事故というよりは“ソビエト”の事故ととらえられている。しかし、まさにこの言い方こそが、原子力発電の有り得るアキレス腱を指し示している。主要な危険性は、技術的故障もしくは事故よりは、人為的なエラーもしくは政治的状況（テロリストの襲撃、内戦、戦争等）によって引き起こされる事故にあるのである。通常状態で運転されている原子力発電所の危険度を評価することは可能である（技術的な事故は、一般的に致死率の観点から評価される）。実際、技術的な危険性のレベルは、他のいかなる産業活動に係るオペレーションにおけるリスクレベルよりも低くなってきており、勿論、喫煙、車の運転、大工や屋根職人としての仕事よりはるかに危険性は低いのである。

原子力に関してしばしば聞かれるもう一

つの反対意見は、最終的な放射性廃棄物処理に対する危惧である。使用済みで放射性のある燃料（再処理の如何に拘わらず）はどのように処理されるべきなのか。放射性廃棄物は、どこに、どのように貯蔵されるべきなのか。原子力発電設備は、必要がなくなつたときに、どのように解体されるべきなのか。原子力発電会社は、明らかにまだ、コミュニケーションについて多くのことを学ばなければならない。というのもこの業界は、原子力発電のコストを著しく増加させることが無い程度の費用で、既に開発された技術か、あるいは必要な時期には利用可能になっているであろう技術により、この問題を解決する手段を講じなければならない事態に既に直面しているか、あるいは直ぐに直面するからである。

原子力産業に対する三つ目の疑問は、核分裂物質即ち、燃料の供給に関するものである。現在使用されているサイクルでは、ウラン²³⁵の可採鉱量を意味する。幸いなことに、核燃料コストは原子力発電のコストの中では小さな要素であることから、kWh あたりのコストを大きく上げることなく、現在使用されているウラン鉱石の許容最小品位をかなり下げることができる（必要であれば、海水からのウラン採取も可能）。さらに、もし kWh あたりのコストが上昇するほど核燃料資源が枯渇していくことになれば、業界は 15～20 年以内に高速増殖炉開発を再開するであろう。高速増殖炉は、同量のウラン²³⁵から 30～40 倍の電力を取り出せる。世界で最も進んだプロトタイプであったフランスのスーパーフェニックスがついに稼働停止となったことは、かなりの驚きであった。ウラン²³⁵資源は

2050 年までには不足するであろうこと、及び高速増殖炉が使用済燃料廃棄問題解決に必ずや貢献するであろうことを考慮すると、フランス政府の稼働停止決定は合理的とは思えない。逆に、温室効果に関する確実なデータはまだ無いが、予防原則からすれば、このような発電設備は、関係当局により安全と認められた最大容量で可能な限り長期にわたり稼働すべきである。そうすれば、電力業界は、産業レベルで 30～40 年間に渡る高速増殖炉の運転から、運転及びメンテナンスコスト、設備老朽化問題及び信頼性等の知識を得ることで恩恵を受けることができるであろう。そのような経験は、実際の運転が会計上、多少の純損失がでるといふありそうもないことが起こったとしても、プラントの長期的運転を正当化して余りある、非常に貴重なものである。

そして勿論、原子力発電の長期的な可能性の評価は、現在、産業で利用されている核サイクルだけではなく、全ての潜在的な可能性のある核サイクルを含めたものでなければならない。まず、2010～2020 年までに、信頼性があり運転の容易な小規模（100～500MW）原子力プラントの需要が、特に、経済成長の著しい国々において生じるであろう。高温・ヘリウム冷却サイクル（HTR）が、この目的に適っている。その他のサイクルは、過熱及び炉心溶融の危険性をさらに低下させるために使用され得る。このことに留意しつつ、ノーベル物理学賞受賞者の Carlo Rubbia は、原子炉のいかなる機能であっても通常の運転特性値を超えるやいなや粒子の外部流出を自動的に停止させる、いわゆる“破碎炉”を提唱した。さらに長期的には、核融合炉も視野に入ってくる。

高温若しくは低温核融合のどちらが解決策になるかについては議論があるが、長期的には、ある形式の核融合が利用可能な原子力の選択肢に加わることになりそうである。これが、原子力エネルギーを単数ではなく複数で言及するほうがより正確であるという理由である。

要するに、原子力発電を歴史上の突発的なものであり、消え去る運命にあるものとするのは、全く現実的ではなく、原子力エネルギーは 2050 年よりかなり前に復活するであろう。

6 . 2050 年における世界エネルギー需給

締めくくりの評価で使用されているアプローチは、次のとおりである。第一に、様々な化石燃料の生産レベルの評価には可採鉱量及び考えられる生産コストを要素として盛り込む。次に、2050 年までに必要となる非炭素エネルギー量を決定するために、エネルギー需要と比較する。

まず、化石燃料の 2050 年における生産量について考察する。石炭に関しては、生産の制約要件には、利用可能な可採鉱量すなわち経済的に生産可能な量（資源量、すなわち単にそこに存在するというだけの資源量と異なる）及び許容される二酸化炭素排出レベルを含めた。いうまでもなく、硫黄、メタン、煤塵及び灰分もまた、同様に局地的汚染を超え、広域的・地球規模的な問題となる。将来の石炭発電所では、特にガス化プロセスが利用されれば、排出される煤塵の殆どは集塵出来るようになるものの、何百万にもものぼる家庭の煙突から排出される煤塵に対しては、僅かしか対応出来ない。硫酸化物についても同じことが言える。

また、全ての石炭鉱床には大量の石炭層メタンが存在し、採掘（露天掘りであろうと坑内掘りであろうと）の際に、直接大気に放出される。

石炭輸送の高コスト（単位エネルギー当たりの輸送コストはガスよりも更に高い）を考慮すると、炭鉱元での石炭から電力へのクリーンな転換（ガス化の如何に拘わらず）の可能性はあるものの、地球の石炭資源量の大部分は、2050 年まではまだ可採鉱量とは見込めないであろう。さらに（このことはここでの最も重要な要素であるが）、可採鉱量のデータにはかなりの混乱があると見られ、資源量がある程度、実際の鉱量として誤って算入されている可能性がある。世界の石炭業界も、資源量については殆ど数字を出さないが、可採鉱量については詳細なデータを公表する石油及びガス業界と同じ（又は少なくとも同様の）区分を適用する努力をすべき時期に来ている。

ここでは詳細には触れないが、前述の要素から 2050 年までには石炭及び褐炭の世界の生産量は、現在の 4.8Gt（10 億トン）（2.2Gtoe/年）から 8～10Gt（4-5 Gtoe/年）に増大することが示唆される。これらの数値は（このシナリオの弱点であるが）CO₂の大気への排出制約が生産量に大きな影響をもたないことを前提としている。この見解は、人類が最終的には今日、合理的に受け入れられると思われるより、はるかに大きな地球温暖化のリスクを受け入れると仮定している。

石油消費については、可採鉱量の枯渇により、おそらく 2010～2020 年にかけて急速に落ち込んでくると見られる。その時期までには、以下の二点が、ほとんどのアナリ

ストにも明らかとなっているであろう。即ち、新たな発見が消費によって失われる量をもはや補填できなくなってきていること、また、可採鉱量と消費の統計上の増加が主に、既発見の在来型鉱床の可採鉱量の増加と、非在来型資源から在来型可採鉱量への転換による可採鉱量の増大（これには、主として超重質原油及びビチューメンから 2050 年までに新たに 5,000 億～1 兆バレル相当の可採鉱量が追加され、また、深海及び超深海油田からは 1,000～2,000 億バレル相当の可採鉱量が追加される）によるということが明らかになる。この認識が加わる事で、価格高騰による消費の抑制を引き起こすような可採鉱量の減少ペースはおそくなる。世界の生産量 3.7Gtoe は 2010～2020 年頃にピークを迎え、現在より 30%以上は上回らない 5Gtoe 程度に増え、その後 2030 年には約 4.5Gtoe へと急速に減少するということになりそうである。2050 年頃には全ての生産量は、現在のレベル即ち、3.5Gtoe に、天然ガスもしくは人造ガス（石炭、バイオマス及び廃棄物起源）の G T L 転換で生産されるごく少量の液体炭化水素を加えた量程度まで減少する。このシナリオは、石油の確認埋蔵量だけではなく究極埋蔵量及び可採埋蔵量に関する最近の利用可能なデータとも整合的である。

天然ガスについては、そこに存在するだけの量、即ち、究極資源量の正確な知見が不足していることから、予測はより困難になる。一度、エネルギー産業が、新規発見ではもはや消費される可採鉱量を賄いきれないと理解すると、可採鉱量の問題が再び、重要性をもってくる。現在の見通しでは十分に豊富な可採鉱量があるが、この楽観論

が続くのは 2010~2020 年までくらいであろう。しかし一度、現実が分かり始めると、天然ガスの場合は既に発見されている鉱床の再評価の余地が石油よりも少ないため、石油のケースよりも幻滅に満ちたものになりそうである。石油可採鉱量の場合に期待される 2 つの要素 - 最初の評価時の過小評価（あるいは過小発表）と回収率の技術的向上の内、天然ガスの場合は前者のみが期待できる。しかし、この要素だけでもかなりの違いが生じる。Groningen ガス田の場合、30 年間でその可採鉱量は 3 倍となってきた。一方、ガス田の中には、可採鉱量に全く変化のないものもある。Frigg 及び Lacq ガス田の実際の可採鉱量は、両ガス田がいまや枯渇（又は殆ど枯渇）していることから推定が容易であり、生産の初年度に発表された推定量に極めて近かった。このことから大きな疑問が出てくる。Urengoi、Yamal 半島及び North Dome-South Pars のガス埋蔵量は、Groningen もしくは Frigg のいずれのタイプであろうか。当初の推定量がかなり正確であり、再評価の余地がないことが、2010 年以前にも、おそらく明らかになるであろう。ガス可採鉱量に関する第二の疑問は、今後の 20~30 年間で、天然ガスの探鉱によりボリビア南部のガス田地域に匹敵する 50 ヶ所程度の新しいガス田地域を発見することが可能か、あるいは 12 ヶ所未満しか発見出来ないのであろうかということである。12 ヶ所未満というのが、妥当なところであろう。

世界のガス生産のピークレベルを下げそのような別の要素としては、天然ガス産業には物理的な柔軟性が乏しい事と、大規模な投資が必要となる事とがある。実際、大規模

なパイプライン及び液化プラントは、平均 30 年の採算性のある操業が保証されなければ新たには建設されないであろう。ガス生産量のピーク又は少なくとも最大ガス生産量の高原状態（30~40 年は続きうる）は、2015~2025 年頃に始まり、2050~2060 年ころまで続く。その後、世界のガス生産量は減少していく。堆積盆地の深部層準の探鉱により予期せぬ巨大なガス田が発見された場合や、技術革新によりガスハイドレート資源をガス埋蔵量に転換できるようになれば、天然ガス生産量の減退は遅れることもあり得る。両方のケースとも可能性はあるが、不可能に近い。

高原状態での生産量は、現在の生産量の 2 倍強 4.5 Gtoe/年程度であろう。そこで、上述の推定を考慮すると、2050 年までの全体的な化石燃料生産量は、石炭 4.5 Gtoe、石油 3.5 Gtoe 及びガス 4.5 Gtoe となり、化石燃料合計では 12.5 Gtoe となる。しかし、最大需要シナリオでは、全エネルギー需要は、25~30 Gtoe となりそうである。前述の世界の人口を 100 億 \pm 10 億人では無く 80 億 \pm 20 億人と想定する、より控え目なシナリオでも、全体のエネルギー需要は依然、18 Gtoe と現在の消費量 9 Gtoe の 2 倍となる。たとえ後者の控え目なシナリオを受け入れるとしても、非炭素エネルギーで賄われなければならないエネルギー不足分は、2050 年時点で 5.5 Gtoe とかなりの量となる。

上で予測したように再生可能エネルギーが 1~1.5 Gtoe しか貢献しなければ、4~4.5 Gtoe の非常に大きなエネルギー不足を補うために、2050 年までに核分裂の出番が要請されるであろう。これらの結論は、表 8 にまとめてある。

**A vision of long term world energy balances
2000 - 2020 - 2050**

Source: Revue de l'Energie, 50 ans, n° 509 Sept. 99

	2000		2020		2050	
	Gtep	%	Gtep	%	Gtep	%
Oil	3.7	40	5.0	40	3.5	20
Natural gas	2.1	22	4.0	27	4.5	25
Coal (including lignite)	2.2	24	3.0	20	4.5	25
Total fossil fuels	8.0	86	12.0	87	12.5	70
Renewables From which used for electricity generation	0.7 (0.5)	7.5	1 (0.7)	6.5	1.5 (0.9)	8
Nuclear	0.6	6.5	1	6.5	4	22
Total commercial energies	9.3	100.0	14.0	100.0	18.0	100.0

Global Foundation - November 26/28, 2000 GPRB9_01.ppt - Pierre René BAUQUIS

Table 8 - A vision of medium and long term world energy balances

これらの結論を記憶しやすいように、過去（図 8）及び過去と将来（図 9）の世界の最終エネルギー需要を図化した。気候変動に関連する問題はこのペーパーでは中心テーマではなかったが、利用するエネルギー源の変遷に伴う石油換算トンあたりの炭素排

出量の時系列変化実績（図 10）と 2050 年までの大気中の二酸化炭素濃度変化予測（図 11）を示しておく。この数値は当然、我々自身のエネルギーミックス・シナリオに基づくものであり、それゆえ表 8 の見通しを反映している。

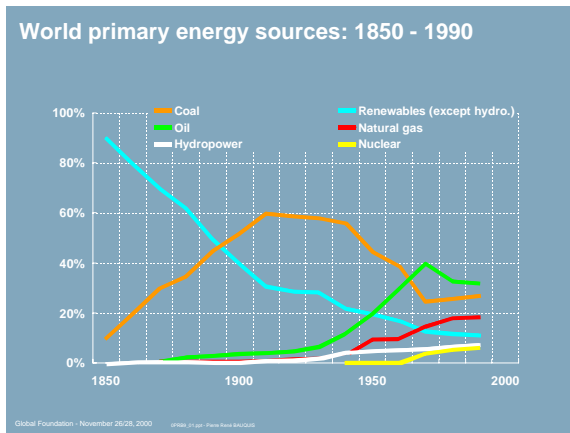


Figure 8 - World primary energy sources: 1850 - 1990

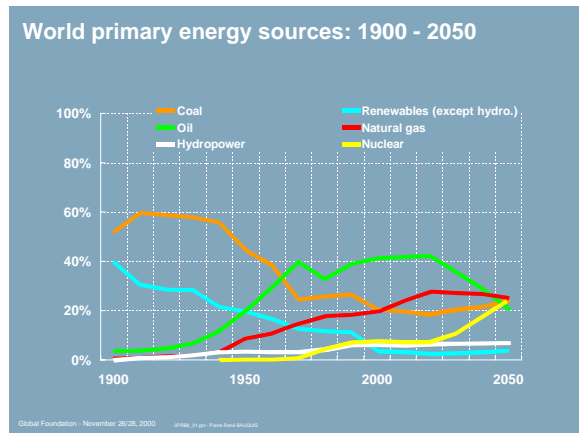


Figure 9 - World primary energy sources: 1900 - 2050

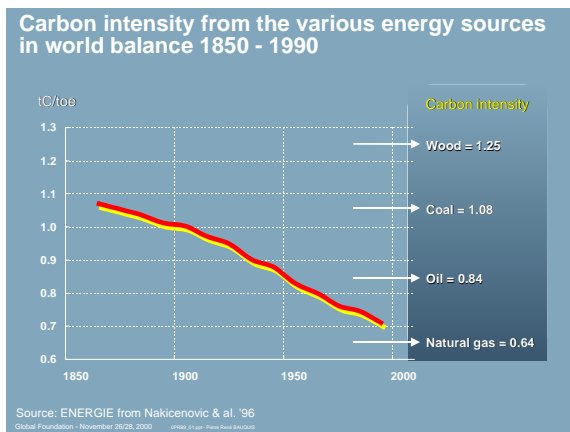


Figure 10 - Carbon intensity from the various energy sources

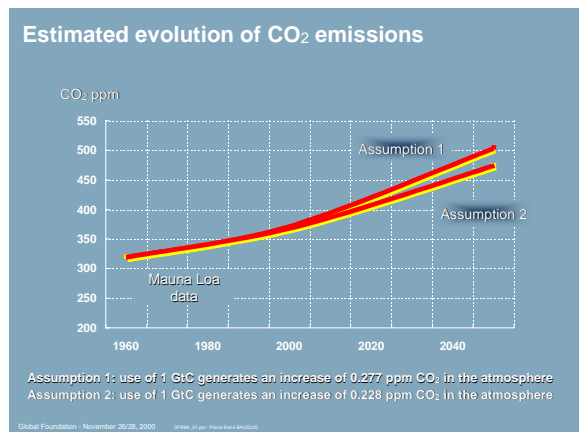


Figure 11 - Estimated evolution of CO₂ emissions under table 8 scenario

7. 結び

短期的・中期的なエネルギー産業の将来展望に係る多くの主要な問題点については、ここでの評価からは意図的に除外した。地政学、資源の地理的偏在、企業の合併・買収及び石油、ガス及び電力会社の多様化の動きについては、なんら触れていない。技術面では、複雑な炭素隔離 - それが生物的（森林等）化学的もしくは物理的（注入等）であろうと の問題、もしくは炭化水素か

らの“脱炭素”、酸素燃焼発電所（大気中の窒素による二酸化炭素の希釈を無効にする）の問題、その他の同様の問題についても触れていない。これは、これら全ての問題は興味深いものではあるが、2050年のエネルギー需給の評価にとっては、比較的小さい問題であるためである。集中型発電（大規模水力、大規模石炭火力、ガス火力、原子力発電所）と分散型発電（再生可能エネルギー、燃料電池、小規模コジェネレーシ

ョン、マイクロタービンもしくは小規模原子力)間の競争についても議論していない。これは、これらの課題もまた、何れも 2050 年のエネルギー需給には重大な関係を有していないことによるものである。この見解には驚かれる向きもあるかもしれないが、マイクロタービン及びおそらくは定置型燃料電池といった技術は主に天然ガスを消費すること、一方、自動車の動力となる燃料電池は液体炭化水素もしくは類似する液体エネルギー化学物質から水素燃料を得ることになるであろうことを忘れてはならない。水素の必要量を生産するには、新型の内燃エンジンを使用するときには発生する二酸化炭素とおおよそ同量の二酸化炭素が発生してしまうことを忘れてはならない。というのも、水素生産が車載で行われる場合、最もありうる水素生成プロセスは、液体石油製品か液体化学誘導体の改質(あるいはその他の化学的反応)であるからである。水素生産が水素供給ステーションのような車より上流で行われる場合は、供給源として天然ガスが最も可能性が高い。水素生産が大規模水素生成プラントのようなさらに上流で行われる場合は、供給源としては原油、ガス、石炭もしくはバイオマスのどれかが有り得る。そのような場合に、大規模水素製造プラントを使用する狙いは恐らく、二酸化炭素が大気中に排出されないように二酸化炭素の隔離(再圧入等)ができる可能性があることであろう。

温室効果の重大性(事実であろうと思込みであろう)についての広範なパニック及び非常に高い二酸化炭素隔離のコストのみが、近い将来(大体 2020 年以前)の他の水素生成オプション(原子力による電気

分解もしくは熱分解)のコストを妥当とする。環境に対する懸念が破滅的なまでに大きくなれば、-それは全くありそうもないが-二酸化炭素を発生させない発電及び水素(即ち、必然的に原子力発電により供給)への需要は急増する。その段階で、フランスがスーパーフェニックス高速増殖炉を政治的理由により閉鎖したことで、20~30 年間以上の高速増殖炉の運転から得られる経験を失った事を嘆くことになるであろう。

最後の分析では、超長期のエネルギーミックスに直結する二つの重要な要素に、焦点を当てる。

最初の要素は、今後数十年間における二酸化炭素の大気中におけるレベルと、二酸化炭素レベルが気候変動に与える影響に関するものである。ここで仮定したエネルギーミックスを前提とした 2050 年時点における大気中の二酸化炭素濃度は、図 11 のグラフを参照されたい。御覧のとおり、二酸化炭素レベルは、200 年足らずの間に、既に 280 から 360ppm へと上昇しており、今後も増大し続け約 500ppm に到達する(即ち、2050 年までには 450~550ppm の間)。

この状況は、今後 20 年の間にいかなる政策が導入されようともほとんど不可避と思われる。これは主として、既存のエネルギーシステム(即ち、エネルギー生産及び消費双方の既存インフラへの巨大投資)の“慣性効果”によるものである。大気中の CO₂ 水準が、非常に大きな気候変動を経験した過去 40 万年に渡って 300ppm を決して超えることがなかったとすれば、我々は、500ppm 程度のレベルの気候への影響については想像するしかない。数学的気候モデルがいかに進歩しようとも、大きな不確実

性が存在するのである。しかし、影響が小さくとも、大きくとも、もしくは壊滅的(ありそうもないが、全く起こりえない事ではない)であっても、我々は、その環境の中で生きていかなければならない。

将来のエネルギーミックスから生じる 2 番目に重要な要素は、化石燃料と原子力発電間の長期的に増大する相補性あるいは相乗効果であろう。この相補性は、この 2 つのエネルギー資源種の利用状況から、今日でも既に明らかである。液体炭化水素は、もともと次のような 3 つの異なる利用形態に適していることを銘記しておく必要がある。

- 原材料(石油化学製品、薬品、溶剤、潤滑油、アスファルト等)として
- 輸送用燃料(陸上、海上、航空)として - 単位体積あたりのエネルギー含有量が大きいことから
- エネルギー需要が相対的に大きい送電網未設置区域(孤立した工場、農場、農園、村等)へのエネルギー(熱、電力)供給手段として - 液体炭化水素の輸送コストは小さいためこのような状況における対策が可能となる。遠隔地の送電網未設置区域の顧客を含めてエネルギー需要の低い状況では、再生可能エネルギー、中でも太陽電池システムが、普及されるべきである。

今日及び次の 20~30 年間における原子力エネルギーの役割は、炭化水素の場合とは異なり、需要が大きく、地理的に集中している地域への電力供給に限定される。したがって、特徴の違いから、原子力と化石燃料は今日でも既に、競合するというよりはかなり相補的な関係にある。

2050 年に近づいてくると、化石燃料と原子力発電の相乗効果は高まるに違いない。この時期には、油田、特に重質・超重質原油油田からの回収率を益々改善させる必要があるであろう。オイルシェールの生産にまで頼る必要があるかもしれない。そのプロセスは 20 世紀初頭に広く用いられていた(米国で第 1 次オイルショック後に再開を試みたが明らかに失敗した)。CO₂ 排出を極小化すると同時に、これらの目的を達成するためには、石油産業は、非化石熱エネルギーを使用しなければならないであろう。このことは、必要とされるエネルギーはいずれにせよ、おそらく原子力によって供給されることを意味している。

GTL プロセスにも同じ考えが当てはまる。というのも、GTL がエネルギーを大量消費するという(今日のプロセスは、投入エネルギーの 35~45%を消費する)は、CO₂ 排出に対する課税措置等が導入されれば、GTL は経済的に見合わなくなることを意味する。ここで再度触れるが、原子力は、これらのプロセスに熱を供給するという、まさにうってつけの解決策を提供するであろう。そうすれば液体炭化水素資源を、現在予期されている以上に長く利用することができる。

さらに、原子力による水素が(CO₂ 排出に関連するコストなど外部コストを考慮した)総コストベースで競争力がつけば、炭化水素と原子力による水素システムの相乗効果は、さらに進むに違いない。その段階では、重質・超重質原油の改質及び様々な石油製品及び石油化学製品の軽質化・高度精製の用に供される主要な精製及び石油化学プラントにおいて、おそらく原子力によ

る水素が使用される。しかしながら、たとえ 2050 年までに原子力産業が妥当な価格で大部分の水素を供給できるとしても、水素ベースのエネルギーシステムは、既に概略述べてきた基本的理由により、非経済的もしくは非効率的であり続けるであろう。幸いなことに、原子力による水素が石油産業の資源ベースを拡大するために活用される他の手段がおそらく存在するであろう。実際、水素をよりエネルギー集約的にする最上の方法は炭素を付加して Fischer-Tropsch 反応のエコフレンドリー版によって合成炭化水素を製造することである。このことは、脱炭素が一般に万能の解決策と考えられている現状を考慮すると、むしろ逆説的に思えるかもしれない。

結論は、地球温暖化への懸念が、2050 年までに世界のエネルギー源選好を大きく変

える引鉄とならなくても - これが前述の予測の基礎となる仮定である（全体のエネルギー供給不足に見合わせるため石炭利用を比較的多めとする） - 2020 年までには、エネルギーミックスの大きな変化が始まるに違いない。

2020 年までは、炭化水素（石油及び特にガス）使用がかなり増加する一方、2030 年以降は、エネルギー需要増加分の大部分は、原子力発電によって賄われなければならないであろう。それ故に、我々は、これらの不可避的な事実を受けとめ、主に原子力に依存する長期的将来 - もっと正確に言えば、化石燃料と核分裂が持続可能なエネルギーの将来を担保する相補的エネルギーとなる世界 - に備えるべきである。

お問い合わせ：ieej-info@tky.ieej.or.jp

ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, HYDROCARBONS AND NUCLEAR: COMPLEMENTARY ENERGIES ①

Making optimum use of each energy source

- *Liquid hydrocarbon resources are limited, so they should be used efficiently - i.e. where their high energy density and chemical richness are fully exploited:*
 - **as transport fuels (land, sea and air)**
 - **as raw materials (petrochemicals, chemicals, solvents, etc)**
- *Heat production, including for power generation, is a less efficient use of liquid hydrocarbons (except "bottom of the barrel" cuts and for off-grid consumers or cases where the grid is deficient)*
 - **gaseous hydrocarbons are a more efficient option in certain cases in both the short and medium terms. However, after 2050 gas resource problems become very likely**
 - **in other cases, nuclear power is (already) the best solution in countries with high safety standards. By 2020-2050, nuclear power should be very widespread (need for small "fail-safe" reactors)**

**Figure 12 - Energy and Sustainable Development Hydrocarbons and Nuclear Energy :
Complementary, not competing - 1**

ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, HYDROCARBONS AND NUCLEAR: COMPLEMENTARY ENERGIES ②

Energy complementarities: 2050 and beyond

- *Production of hydrocarbons that are difficult to extract from the reservoirs holding them requires considerable amounts of energy (e.g. steam injected into the reservoir, thermal treatment on the surface in the case of mined production). One way to minimize CO₂ production is to use nuclear-generated calories.*
 - **further improvement in recovery rates from conventional deposits, and a fortiori in the case of heavy or extra-heavy crudes (Athabasca, Orinoco) using nuclear-generated heat**
 - **possibility of economic production of oil shales or gas hydrates?**
 - **possibility of improving gas-to-liquid (GTL) or "coal liquefaction" processes using nuclear-generated hydrogen: eco-friendly Fischer Tropsch**
- *The nuclear industry could produce hydrogen for massive demand in refining and petrochemicals processes*

**Figure 13 - Energy and Sustainable Development Hydrocarbons and Nuclear Energy :
Complementary, not competing - 2**

HYDROGEN AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT: SOME PARADOXES - ①

Hydrogen and economic fundamentals

- *Hydrogen is and will remain expensive to produce:*
 - currently and until about 2030-2050, hydrogen will be produced using fossil energies, and will cost some 2 to 5 times (per energy unit) the cost of the fossil fuels used to produce it
 - in future, i.e. 2030 onwards, nuclear hydrogen will gradually take over (produced either by electrolysis or by direct thermal water decomposition)
- *Hydrogen is and will remain expensive to transport and store*
 - pipeline transport of hydrogen costs and will continue to cost 10 to 15 times more (per energy unit) than liquid hydrocarbons (« technical progress » cannot change the basic laws of thermodynamics)
 - the cost of storing hydrogen (pressurized, cryogenic, adsorbed or chemically combined) may come down, but it will remain much more expensive than storing liquid hydrocarbons (a 100 times factor ... even in 2050)

Figure 14 – Hydrogen and Sustainable Development : Some Paradoxes - 1

HYDROGEN AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT: SOME PARADOXES - ②

Hydrogen and its uses

- *As heat energy (industrial boilers, steam, electricity, space heating, air-conditioning, etc.)*
 - hydrogen is a less efficient vector than electricity. Both electricity and natural gas involve equivalent logistics costs, whether for huge quantities or for final networks, while hydrogen is and will remain 3 to 4 times more expensive than natural gas to transport and distribute (basic physics)
- *As transport fuel (road transport, aviation, maritime shipping)*
 - the advantage of using hydrogen is its absence of urban pollution (whether used in internal combustion engines, turbines or fuel cells). But the high cost of logistics and on-board storage (cars, aircraft, ships) means that hydrogen is handicapped by its low volumic energy content
- *The most efficient way to use hydrogen as a transport fuel would probably be to “carbonize” it, thus producing synthetic hydrocarbons*

Figure 15 – Hydrogen and Sustainable Development : Some Paradoxes - 2

注 (*): 有益なコメントとサジェスチョンを頂いたAlba, Denis Babusiaux,Emmanuelle Bauquis, Jean-Claude Boudry, Georges Dupont-Roc, Jacques Foos 及び Roland Geoffrois各氏に感謝します。

注 (**): この論文は、仏語でLa Revue de l'Energie誌の第509号 (1999年9月50周年記念号) に掲載された。初出論文には図表は載せておらず、本論文に結論部分とともに掲載した。

注 (***) : 石油・天然ガス可採鉱量を取り扱った著者の論文は以下の通り。

i) (P.R. Bauquis, R. Brasseur and J. Masseron) “Les réserves de pétrole et les perspectives de production à moyen et long terme” in *Revue de l'IFP*, vol 27, N° 4, July-August 1972, pp. 631-658.

ii) P.R. Bauquis, “L’effet de serre et les réserves énergétiques”, in *Energies*, N° 35, Spring 1998, pp. 11-12.

iii) P.R. Bauquis, “What future for extra-heavy oil and bitumen: the Orinoco case”, *17th Congress of the World, Energy Council*, Houston, September 1998.

iv) P.R. Bauquis, “Défis techniques et enjeux économiques des huiles extra lourdes” in *Pétrole et Techniques*, N° 417, pages 54-62, Novembre-Décembre 1998.

v) P.R. Bauquis, “Les bruts ultra lourds de l’Orenoque et de l’Athabasca” in *Ingénieurs Géologues* N° 74, Juillet 1999.

注 (****): 日本は既に水素生産向けの高温工学試験炉 (HTTR) を開発している。出力 30MW の HTTR は 1998 年から稼動したが、トラブルで休止された。おそらく 2000 年に運用が再開された。