

Nuclear Power: Climate Fix or Folly?

Amory B. Lovins, Imran Sheikh, and Alex Markevich
April 2008 RMI Solutions article "Forget Nuclear," updated and expanded by ABL 31 Dec 2008

Nuclear power, we're told, is a vibrant industry that's dramatically reviving because it's proven, necessary, competitive, reliable, safe, secure, widely used, increasingly popular, and carbon-free—a perfect replacement for carbon-spewing coal power. New nuclear plants thus sound vital for climate protection, energy security, and powering a vibrant global economy.

There's a catch, though: the private capital market isn't investing in new nuclear plants, and without financing, capitalist utilities aren't buying. The few purchases, nearly all in Asia, are all made by central planners with a draw on the public purse. In the United States, even now—2005 government subsidies approaching or exceeding new nuclear plants' total cost failed to entice Wall Street to put a penny of its own capital at risk during what were, until autumn 2008, the most buoyant markets and the most nuclear-favorable political and energy-price conditions in history—conditions that have largely reversed since then.

This semi-technical article, summarizing a detailed and documented technical paper¹, compares the cost, climate protection potential, reliability, financial risk, market success, deployment speed, and energy contribution of new nuclear power with those of its low- or no-carbon competitors. It explains why soaring taxpayer subsidies haven't attracted investors. Capitalists instead favor climate-protecting competitors with lower cost, construction time, and financial risk. The nuclear industry claims it has no serious rivals, let alone those competitors—which, however, already outproduce nuclear power worldwide and are growing enormously faster.

Most remarkably, comparing all options' ability to protect the earth's climate and enhance energy security reveals why nuclear power could never deliver these promised benefits even if it could find free-market buyers—while its carbon-free rivals, which won more than \$90 billion of private investment in 2007 alone², do offer highly effective climate and security solutions, far sooner, with higher confidence.

Uncompetitive Costs

The Economist observed in 2001 that "Nuclear power, once claimed to be too cheap to meter, is now too costly to matter"—cheap to run but very expensive to build. Since then, it's become severalfold costlier to build, and in a few years, as old fuel contracts expire, it is expected to become severalfold costlier to run.³ Its total cost now markedly exceeds that of coal- and gas-fired power plants, let alone the even cheaper decentralized competitors described below.

¹A.B. Lovins & I. Sheikh, "The Nuclear Illusion," *Amibio*, forthcoming, 2009; RMI Publ. #E09-01, prepared at www.rmi.org/images/FILES/E09-01_AmibioIllusion.pdf, to be updated in early 2009 for publication. Justin Winter for Michael Liebreich (New Energy Capital, London), personal communication, 1 Dec 2008, updating the firm's earlier figure of \$70 for distributed renewable sources of electricity. The \$90B is net-on-up, transaction-by-transaction and excludes M&A activity and other double-counting. Reliable estimates of investment in no-carbon (renewed-wind/heat) or relatively low-carbon (small hydro) generation are not available, but total global cogeneration investment in 2007 was probably on the order of \$20B or more.
²Due to prolonged mismanagement of the uranium and enrichment sectors. *Nuclear Power Joint Fact-Finding*

Nuclear Power: Climate Fix or Folly?

Amory B. Lovins, Imran Sheikh, and Alex Markevich
RMI Solutions article "Forget Nuclear," April 2008
Updated and expanded by ABL, December 2008

http://rmi.org/cms/Download.aspx?id=1138&file=E09-01_NuclPwrClimFixFolly1i09.pdf

原子力：気候問題解決策？ あるいは、愚行？

ロッキー・マウンテン研究所 (RMI)
2008年12月

エイモリー・B・ロビンズ
イムラン・シェイク
アレックス・マーカビッチ

{翻訳: グリーン・アクション}

[以下は抜粋]

原子力は活気にあふれた産業であり、劇的に復活しているのだと聞かされる。何故なら、原子力は実証済みで、必要であり、競争力を持ち、信頼性があり、安全で、安定的に確保出来、広範に使われ、人気が高まりつつあり、炭素を含まず、炭素をまき散らす石炭火力に取って代わる理想的なものだ、というわけである。つまり、新しい原子力発電所は、気候の保全、エネルギー安全保障、活発な世界経済のエネルギー供給にとって欠かすことができないかのように聞こえる。

しかしここには落とし穴がある。民間資本市場は、新しい原子力発電所に投資しておらず、投資家型電力会社は、融資がないので、買いに出していない。わずかながらの購入は—ほとんどすべてがアジアでのもので—すべて、公共資金を引き出せる中央政府の計画者らによるものだ。米国では、新しい原子力発電所の総費用に近い、あるいはそれを超える 2005 年の新しい政府助成金をもってしても、投資家自身の資本をただの 1 ペニーもリスクに曝すよう促すことはできなかった。2008 年の秋までは、歴史的に言って、これほど市場が活気を呈し、また、政治的な面でもエネルギー価格の面でも原子力にとってこれほど有利な条件が存在したことはなかったというような状況であったにも関わらずである。これらの条件は、その後、大部分が逆転してしまった。

幾分技術的な本稿⁽¹⁾は、脚注を付けた詳細な技術的論文を要約したものである。本稿では、コスト、潜在的気候保全能力、信頼性、財政的リスク、市場の成功、利用

GREEN ACTION

606-8203 京都市左京区田中関田町 22-75-103
Suite 103, 22-75 Tanaka Sekiden-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8203 Japan
www.greenaction-japan.org

T: + 81 75 701 7223
F: + 81 75 702 1952
E: amsmith@gol.com

が可能になるまでの時間、エネルギー面での寄与などの点で、炭素放出の少ない、あるいは全くない競争相手と、新規の原子力発電を比較する。そして、納税者による原子力への助成金の額が上がり続けても、なぜ投資家を引きつけるに至っていないかを説明する。資本家は、原子力ではなく、これと競合するもっと低コストで、建設期間が短く、そして、財政的リスクの小さな気候保全手段を好む。原子力産業は、このような競争相手はもちろんのこと、本格的なライバルはいないと主張する。しかし、これらの競争相手は、世界全体で、原子力よりエネルギー生産量が多くなっており、ずっと速い速度で成長している。

注目すべきは、地球の気候を守り、エネルギー安全保障を高める上でのすべてのオプションの能力を比べてみると、原子力が、たとえ自由市場でその買い手が見つかったとしても、何故これらの約束された利点を決して提供できないかが明らかになる、という点である。その一方で、炭素を放出しないライバルたちは、2007 年だけでも、民間の投資を 900 億ドル以上得ており⁽²⁾、実際に、非常に効率的な気候及びエネルギー安全保障面の解決策を、ずっと早く、高い確実性をもって、提供するのである。

コスト面での競争力を持たない原子力

『エコノミスト』誌は、2001 年に、「安すぎてメーターの計測対象にしようがないとかつて主張された原子力は、今や高すぎて検討対象にしようがない」と評している。運転コストは安い、建設コストが非常に高いというのである。その後、原子力は、建設コストが数倍高くなっており、古い燃料契約が数年で期限切れとなる中で、運転コストも数倍高くなると見られている。原子力の総費用は、現在、石炭・ガス火力発電所のそれを大幅に上回っている。石炭・ガス火力発電所よりさらに安い分散化型の競争相手と比べた場合はいうまでもない。

建設コストは、世界全体で、原子力発電所の方が非原子力発電所よりずっと急速上昇している。・・・実質的資本コストの高騰の原因は、主として、原子炉を製造、建設、管理、運転するための世界的インフラの深刻な衰退である。・・・それはまた、世界中の買い手が、エンジニアリング・調達・組み立て・建設などの面で、深刻な不足・ボトルネックなどによる高額な割増金を支払わされることを意味する。（幾つかの重要な部品では、世界中で一つしか供給源がない状態である。）この衰退状態の深刻さを示しているのが、原子力産業の目玉と言わなければならないフィンランドのプロジェクトである。フランスの原子力建設のトップ企業に率いられているこのプロジェクトは、3 年の建設作業を経た現在、予定より少なくとも 3 年の遅れと、50% の予算オーバーを抱えている。

「世界原子力協会（WNA）」の戦略・調査ディレクターが率直に指摘しているように、「現在、新しい原子力のコストに関して確とした推定値を出すことはまったく不可能である。」⁽⁵⁾

最終用途の効率向上——最も安上がりのオプション——は、より賢明な技術を使うことによって（ドルや炭素に変えて頭を使うことにより）、キロワット時当たり、より多くの（そしてしばしばより良い）サービスを引き出すことができる。この方法により、カリフォルニアでは、過去 30 年ほど、人口一人当たりの実質収入が 79%（1975–2005 年）上昇しているにも関わらず、人口一人当たりの電力使用量をほぼ横ばいに保っている（電力供給のための投資の約 1000 億ドルを節約）。例えば、カリフォルニアの新しい家屋では、以前の 4 分 1 ほどしかエネルギーを使わない。⁽¹³⁾

節電は、電力を作って送るよりもずっと安上がりになる。既存の発電所の電力と比べてもそうである。

米国電力研究所（EPRI）が認めている通り、エネルギーの効率向上技術の進歩の速度は、その普及速度よりもずっと速い。従って、その節約の潜在的可能性は、どんどん大きく、しかも、安くなっている。⁽¹⁸⁾

多くの一流企業との間の RMI の研究が明らかにしてきた通り、統合的な設計（integrative design）をすると、しばしば、小さな節約や節約ゼロの場合よりもっと低いコストで、素晴らしいエネルギー節約が達成出来る。⁽¹⁹⁾つまり、エネルギー効率の向上は、しばしば、新しい建物や工場の総コストを下げる事ができるのである。通常の改修工事に合わせた改良作業でもそうなることがある。⁽²⁰⁾

風力、コジェネレーション、そして最終用途効率向上*は、すでに、中央集中的熱発電所（原子力と火力を問わず）より安く電力サービスを提供している。このコスト・ギャップは広がる一方である。なぜなら、中央集中的熱発電所は、ほぼ成熟しきっており、コストが上昇しているが、その競争相手の方は、急速に改善され続けているからである。・・・もちろん、通常型の化石燃料火力発電所の高いコストは、その大量の放出炭素を捕獲しなければならいとなれば、さらに高くなる。（*訳注：最後にエネルギーを使う場所でのエネルギー効率の向上。）

上述のコスト比較は、さらに次のような 4 つの重要な理由のために、原子力を優遇する保守的な計算となっている。

- 最終用途効率向上は、しばしば、節約されたエネルギーの 1~2 桁規模の大きい副次的利点を持つ。⁽²²⁾
- 最終用途効率向上及び分散型電源（distributed generator）は、207 個の「分散利点」〔電源を分散させることによって生じる利点〕を持つ。これらは、普通、分散型電源の経済的価値を一桁高める。⁽²³⁾上で計算に入っている唯一の「分散利点」は、コジェネレーションの廃熱の再利用である。
- 変動再生可能エネルギー源（variable renewables）を互いに組み合わせる方法をとると、普通、ある一定の信頼性確保のための容量を半分以上節約できる。

(24) 実際、多様な変動再生可能エネルギー源を、予測を立て統合すると、普通、ある一定の信頼性を確保するのに、大きな熱発電所の場合より、バックアップのための投資が少なく済む。

- 強力な効率向上と再生可能エネルギー源とを組み合わせると、普通、両者は、より安く、効率的なものとなる。(25)

これらの4つの保守性を考慮しなくても、新規の原子力発電所の競争力の劣勢は、はっきりしているが、これらを考慮するとそれは圧倒的となる。下に見るように、市場はこれに同意している。気候対策にとってそれは良いことである。

CO₂の排出量置換面での競争力の劣勢

原子力発電所の運転は、直接的には炭素をまったく放出せず、間接的にも比較的わずかしか放出しない。(26) 従って、原子力は、石炭火力発電所にとって代わるべき最重要の設備と喧伝されている。しかし、この一見分かりやすく見える代替は、もっと安く、実施の速い非原子力技術を使ってできる。つまり、1ドル当たり、そして、1年当たりそれだけ気候問題解決効果が高いということになる。

石炭は、ずば抜けて炭素集中度の高い電力源である。従って、それにとって代わるのが、炭素置換(carbon displacement)の効率の目安となる。1キロワット時の原子力は、石炭で1キロワット時を作る際に放出される0.9キログラムあまりのCO₂をほとんど全てをなくす効果を持つ。しかし、風力による1キロワット時、産業の廃熱利用コージェネレーションからの1キロワット時、あるいは、最終用途効率向上によって節約された1キロワット時もその効果を持つ。そして、これら三つの炭素放出ゼロのエネルギー源は、キロワット時当たりでいうと原子力よりずっと安上がりである。つまり、1ドル当たり、ずっと多くの炭素放出をなくすことができるのである。

産業の複合サイクル・コージェネ発電と建物規模のコージェネ発電は、普通、天然ガスを燃焼する。これは炭素を放出する(石炭の半分ではあるが)。従って、原子力と比べ、ネットの炭素量削減は幾分少なく、キロワット時当たり0.7キログラムほどとなる。(28)

コージェネレーションは、キロワット時当たり原子力よりも削減できる炭素の量が少ないが、送り届けられた電力に関して使われたドル当たりでいうと、原子力より多くの炭素削減をもたらす。なぜなら、コストがずっと小さいからである。配電された電力キロワット時当たりのネット・コスト(原子力を最も優遇する形の比較の数字を使う)でいうと、コージェネレーションは、1ドル当たり原子力と比べて2倍のキロワット時の電力を配電できる。従って、原子力によって0.9キログラムのCO₂を削減する場合と同じコストで約1.4キログラムのCO₂を削減できる。

原子力は、最も高くつくオプションであるため、このように、その競争相手と比べ、1ドル当たりの配電量が少ない。従って、気候保全の点で敗者であるのは驚くに値

しない。炭素排出削減効果で原子力が唯一勝てるのは、中央集中的な、コジェネでない天然ガス燃焼の複合サイクル発電所だけである。(29) ファーム型の風力発電及びコジェネレーションは、CO₂ の削減において原子力の少なくとも 1.5 倍の費用効率を持つ（最新の原発費用推定を使うと約 3 倍となる）。効率向上も、キロワット時当たり 7 セントというほとんど聞いたこともないようなレベルでさえ、そうである。普通に見られているコスト、例えば、1 キロワット時当たり 1 セントでは、原子力の 10~20 倍となる。

新規の原子力は、あまりにもコスト高なので、原子力から効率向上に 1 ドル移転すれば、石炭から原子力に 1 ドルの支出を移転するのと比べ、気候保全効果は、7 倍となる。実際、十分にありそうな想定の下で、電力の効率的利用の代わりに新しい原子力に 1 ドルを使うのは、そのドルを新しい石炭火力に使うのよりも気候に対して悪い効果を持つ！

気候変動問題に対処することについて真剣なのであれば、私たちは、気候保護を拡大・促進するために、資金を賢明に投資しなければならない。原子力は、コストがかかり、建設に時間がかかるから、それよりも安く、利用が可能となるまでの時間の短いライバルではなく、原子力を購入するというのは、気候保全の効果低減と遅延を意味する。

疑問のある信頼性

すべての電力源は、時々、供給停止状態となる。違いは、それがどれほど予測可能か、なぜ、どれほどの頻度で、どれほどの量が、そして、どれほどの期間、供給不能となるかである。最も信頼性の高い強大な発電所も、供給停止を起こす。何十億ワットという大ききで、突然、供給停止となるのである。そして、それはしばしば、長期にわたる。米国の建設された 132 基の原子力発電所（発注された 253 基の 52%）のうち、21%は、信頼性あるいはコストの問題のために永久的に、時期尚早の形で閉鎖されており、その他に 27%が、少なくとも一度は、1 年間、あるいはそれ以上完全に運転停止となった経験を持つ。

一般的に、風力・太陽の占める割合が高まった場合に、電力供給を信頼性のある形で維持するのに必要なバックアップ・貯蔵容量は、既に大きな熱発電所の運転停止に対処するために電力会社が購入しているバックアップ・貯蔵容量より少ない。再生可能エネルギーは信頼性に欠けているという神話のうそは、理論的にも、実際の経験によっても暴かれている。(34)

高い金融リスクを相殺するための多額の補助金

今日の資本市場において、政府は、どう頑張っても、納税者に強制的に買わせることのできる原子力発電所の数しか原子力発電所を持ってない。

融資保証を得るのに必要な「相当の」株式投資が、資本バブルの最盛期でさえ自分たちの資本をリスクに曝すことを拒否した同じ投資家から来るとするのは、さらに

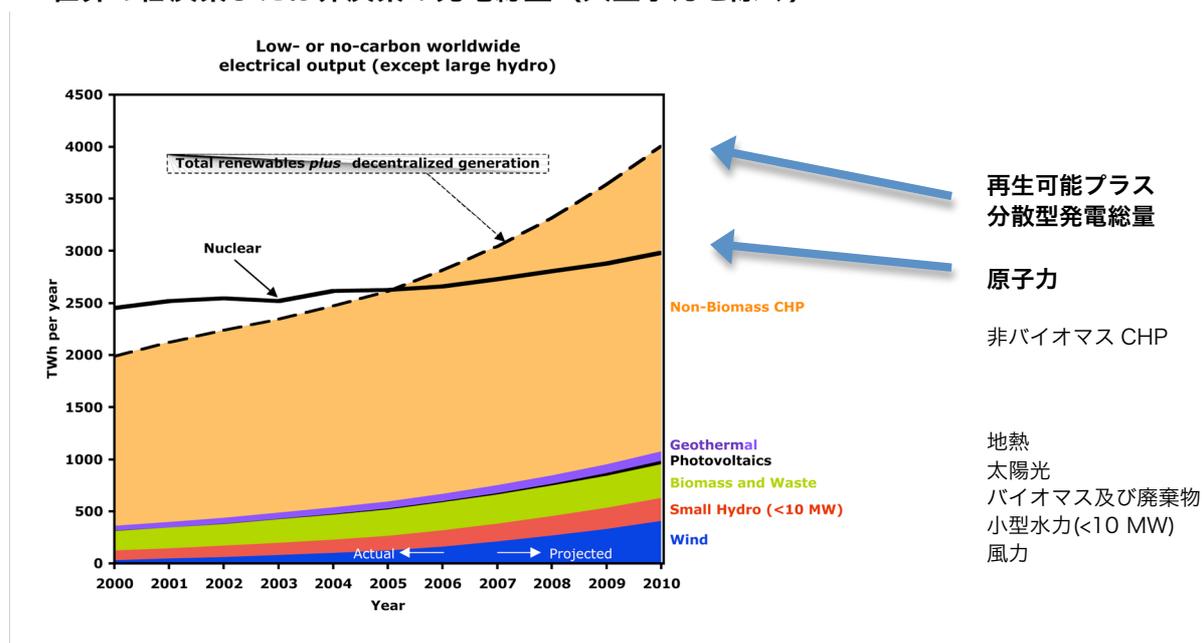
ありそうにない。金融危機は、大きな、進行速度ののろい、高リスクのプロジェクトに対する民間投資を事実上抹殺してしまった。一方、世界の市場で中央集中型の発電所をすでに圧倒している小さくて、実施速度の速い、グラニューラー（granular）型の発電所に対する投資は、それほど下がってはいない。

マイクロ発電革命

原子力が民間資本を引き寄せようと無駄な闘いを続ける中、投資家らは、もっと安い、リスクの小さい代替物——『エコノミスト』誌がマイクロ発電と呼ぶもの——に移っていった。⁽³⁵⁾ 工場や建物における分散型タービン及び発電機（普通、有用な熱を同時に発生させる）や、大きな水力ダム（10メガワット以上のもの）以外のすべての再生可能電力源である。これらの代替エネルギー源は、2002年に世界の原子力容量を超え、2006年にその発電量を超えた。今、原子力は、世界の発電容量増加分の約2%を占めている。これに対し、マイクロ電力は、28%（2004～07年の平均）である——おそらく、2007～08年には、これを相当上回っているだろう。⁽³⁶⁾

原子力よりも一般的に補助金が少なく、また、公平な市場への参入や競争に対する多くの障害があるにも関わらず⁽³⁷⁾、ネガワット（より効率の良い、タイムリーな電力を使うことで節約された電力）やマイクロ発電は、最近、世界の市場で驚くべきパフォーマンスを示している。図5は、マイクロ発電の実際の、そして産業の予測する発電量が、原子力のそれをいかに引き離していつているかを示している。しかも、これは、同等レベルのネガワットの増加や、1メガワット以下の化石燃料発電所は計算に入れていない。⁽³⁸⁾

世界の低炭素または非炭素の発電総量（大型水力を除く）



【図 5】 分散型の低炭素または非炭素エネルギー源——「コージェネレーション（CHP）」（ほとんどがガス火力）及び「分散型」再生可能エネルギー源（大型水力を除く）——による世界の発電総量（実績及び今後発電さ

れると業界が予測している量)。マイクロ発電が 2007 年に獲得した新たな民間資本は 1000 億ドル以上—世界のエネルギー部門の投資の約 8 分の 1—に達する。

それにも関わらず、原子力産業は、その唯一の本格的な競争相手は、大型の石炭及びガス発電所だと主張している。だが、市場は、すでに、この時代遅れの戦いの場を去り、他の二つの戦いの場に移動している。それは、中央集中的熱発電所対マイクロ発電所、それに、メガワット対ネガワットである。例えば、米国が 2007 年に追加した風力発電容量は、過去 5 年間に追加された石炭火力発電容量の合計より大きい。マイクロ発電とネガワットの合計は世界の新規の電力サービスの約半分を提供している。これはすべての新規の中央集中的熱発電所の合計より大きい。マイクロ発電は、現在、それだけで、世界の電力の 6 分の 1、そして、産業国 12 カ国では全電力の 6 分の 1 から半分以上を提供している。ただ、米国は、約 6%と遅れをとっている。

高い炭素価格・税は、このより広い競争状況の中で、原子力をその運命から救うことはできない。もし原子力が石炭とだけ競争するのであれば、市場価格を遙かに超える炭素価格は、原子力を救うかもしれない。しかし、石炭は、克たなければならぬ競争相手ではない。高い炭素価格は、原子力だけでなく、他のすべてのゼロ炭素のエネルギー源の立場を有利にする。再生可能エネルギー源、回収熱コジェネレーション、それに、ネガワットである。また化石燃料ではあるが低炭素のコジェネレーションも、部分的に有利となる。原子力産業は、このことを理解しない。なぜなら、これらの競争相手を重要あるいは正当なものと思わないからである。

小さいことは、速さ、低リスク、そして総潜在力の高さを意味する

小さくて迅速に作ることでできる多数のユニットは、少数の大きくて建設に時間のかかるユニットと比べ、ある量の効果を得るために、より速く展開することができる。携帯電話やパソコンのように販売される広範に入手可能な選択肢は、城のように建設されるどっしりとした発電所よりも、大きな量に、速く到達できる。そして、小さなユニットの方が、ずっと、電力需要の多数の小さな断片に対応し易い。数メガワット級の風力タービンを使った場合でも、非常に速く建設できるため、米国は、新規の原子力発電容量 10 億ワットを獲得できる（というようなことがあったとしてその）前に、1,000 億ワット分（米国の原子力発電容量全部に匹敵）を設置することができるだろう。前述のように、この迅速さは、金融リスクを減らすから、準備時間の短い分散型プロジェクトの融資をより得やすくする。とりわけ、不景気の時期においてはそうである。

個々の規模の小ささにも関わらず、そして、部分的にはその故に、マイクロ発電機と節電とは、すでに大きな総量に到達しつつある。実際、ネガワットとマイクロ発電は、何十年間にも渡って、経済に電力を提供する全責任を負うことができる。米国の電力業界のシンクタンク、米国電力研究所 (EPRI) の計算によると、米国のネガワットの潜在力は、既存の原子力発電所を運転しその電力を送り届けるより安く、その規模は、米国の電力市場における原子力の占める割合 (19%) の 2-3 倍に達する。RMI のもっと詳細な分析によれば、この数値はさらに高くなる。米国の工場で

のコジェネレーションは、原子力と同じ量の電力を生み出すことが出来る。
(39) ・ ・ ・ コジェネレーション、風力、効率向上——今日すべて経済性を持っている——だけを使っても、その量は、現在の米国の原子力発電量の 6-14 倍以上に達しうる。

原子力は、その 10 年に渡るプロジェクト・サイクル、立地の難しさ、そして（何よりも）民間資本にとっての魅力のなさのために、競争力を持つことができないのである。例えば、2006 年、原子力が世界全体で追加した発電容量は、太陽電池より少ない。風力による追加の 10 分の 1、マイクロ発電による追加の 30-41 分の 1 である。大規模水力発電用ダムを除く再生可能エネルギー源は、民間のリスク・キャピタルを 560 億ドル獲得した。原子力は、例年通り、ゼロだった。中国の分散型再生可能エネルギーの発電容量は、原子力発電容量の 7 倍に達し、7 倍の速度で伸びた。そして、2007 年に、中国、スペイン、米国は、それぞれ、世界が追加した原子力発電容量より多くの風力発電容量を追加した。原子力産業は、その成長を喧伝しているが、マイクロ発電の方がすでに大きいし、しかも、18 倍の速さで伸びている。(41)

安全保障上のリスク

原子力発電の市場における失敗を認識し、世界の発展のために安定的に確保できる最低コストのエネルギー・オプションに移行すれば、核拡散国の仮面を剥がし、不利な立場に置くことになる。核爆弾の材料を得るのが難しくなり、それを得ようとするのが目立つようになり、そして、得ようとするのが見つければ政治的コストが大きくなるからである。これにより、核拡散はずっと起きにくくなり、また、手遅れにならないうちに発見することが容易になる。貴重なインテリジェンス資源の焦点を干し草の山ではなく、その中にある針に当てることができるからである。(42)

原子力はまた、他の特別な問題も抱えている。例えば、長寿命の放射性廃棄物、壊滅的事故の可能性、テロ攻撃に対する脆弱性などである。しかし、市場経済においては、これらの問題がなかったとしても、原子力技術は前進できない。だから、これらについてここで検討しなくても良いだろう。

結論

では、他の面では知識のある人々が、なぜ、原子力を健全な気候戦略の重要な要素と見なしているのだろうか。この信念が分析的な吟味に耐えられるからではない。そうではなくて、理由は、次のようなところにあるからである。表面的に魅力的なお話、非常に強力な効果的なロビー、なぜ原子力が以前に失敗したか（ほとんど何も変わっていない）を覚えていないかまったく知らない新しい世代、ほとんどすべての主要政府の指導者らが同時に原子力に好意的であること、分散的解決策よりも巨大発電所、効果的な使用よりも供給の拡大を優先する根深い習慣及び規則、多くの公式データベースに市場の勝者が載っていないこと（電力会社が所有する大型発電所のみを数えることが多い）、むやみに信じやすい怠惰な報道姿勢などである。

原子力について忘れて良い頃ではないだろうか。情報を持った投資家はそうしている。政治家や評論家もそうすべきである。半世紀以上の献身的努力、そして、公共の補助金 5000 億ドルの投下した結果、原子力は、未だに市場で成功できないでいる。私たちが、この明確な判決を受け入れるならば、遅ればせながら、最良の買いものを選ぶ道を進めるようになる。1 ドル当たり、より多くの炭素の削減を、より速く、より確実に、より安定的に提供できる実証された幾つもの方法を、より広範なコンセンサスの上に立って選ぶことができるようになるのである。これまでもよくあったように、健全な気候・エネルギー安全保障戦略への最大の鍵は、市場経済学を真剣に捉えることである。

1. この 900 億ドルは、取り引きごとに加算して積み上げたもの。M&A 活動やその他の二重の計算は含まれていない。炭素ゼロ（回収廃熱）や比較的低炭素の化石燃料燃焼コジェネレーションへの投資に関する信頼のできる推定はないが、2007 年の世界のコジェネレーション投資総額は、恐らく 200 億ドル規模あるいはそれ以上だろう。
2. Justin Winter for Michael Liebreich (New Energy Capital, London), personal communication, 1 Dec 2008, updating that firm's earlier figure of \$71b for distributed renewable sources of electricity.
5. S. Kidd, Nucl. Eng. Intl., 22 Aug 2008, www.neimagazine.com/storyprint.asp?sc=2050690.
7. アジアの 8 つの発電所は、約 4 ドル/ワットの費用になりそうである。これは 2007 年半ばの米国のコスト推定に沿ったものである。
13. Preliminary RMI analysis (K. Wang, kwang@rmi.org, personal communications, Dec 2008).
18. RMI estimated that during 1984–89, U.S. efficiency potential roughly doubled while its real cost fell by threefold.
Since 1990, mass production (often in Asia), cheaper electronics, competition, and better technology, according to James K. Rogers PE, cut the real cost of electronic T8 ballasts by >90% to 2003 (while lumens per watt rose 30%), turned direct/indirect luminaires from a premium to the cheapest option, and cut the real cost of industrial variable-speed drives by ~83–97% (some vendors of midsize motors now give them away). Compact fluorescent lamps became 85–94% cheaper during 1983–2003; window air-conditioners got 69% cheaper since 1993 while becoming 13% more efficient; and low-emissivity window coatings became ~84% cheaper in just five years.
19. Integrative design produces these expanding (not diminishing) returns to efficiency investments:
A.B. Lovins, "Energy End-Use Efficiency," 2005, www.rmi.org/images/PDFs/Energy/E95-28_SuperEffBldgFrontier.pdf, further elucidated in the senior author's five public lectures, "Advanced Energy Efficiency," delivered at Stanford's School of Engineering in March 2007 and posted at www.rmi.org/stanford. RMI's recent redesigns of over \$30 billion worth of industrial projects consistently found ~30–60% energy savings on retrofit, typically paying back in 2–3 years, and ~40–90% savings in new projects, nearly always with lower capital cost.
20. For example, an RMI design for retrofitting a 200,000-ft² curtainwall office building when it needed reglazing anyhow could save three-fourths of its energy at slightly lower cost than the normal 20-year renovation that saves nothing: A.B. Lovins, "The Super-Efficient Passive Building Frontier," ASHRAE J., pp. 79–81, June 1995, www.rmi.org/images/PDFs/Energy/E95-28_SuperEffBldgFrontier.pdf.
22. E.g., ~6–16% higher labor productivity in efficient buildings, higher throughput and quality in efficient factories, better clinical outcomes in efficient hospitals, fresher food in efficient refrigerators, better visibility with efficient lighting, etc. Just counting such side-benefits can, for example, double the efficiency gains in a U.S. steel mill at the same cost.
23. これらの最大のもは、財政学の原則から来る。たとえば、小さくて実施速度の速いモジュラー型のプロジェクトは、大きくて実施速度の遅い「一塊型」プロジェクトより、金融リスクが低く、再生可能エネルギー源は、燃料価格の変動リスクに対するヘッジを提供する。これらの 207 の現象は、英国『エコノミスト』誌の「ブック・オブ・ザ・イヤー」となった次の文献で、データに基づき説明されている。A.B. Lovins, E.K. Datta, T. Feiler, K.R. Rábago, J.N. Swisher, A. Lehmann, & K. Wicker, Small Is Profitable: The Hidden Economic Benefits of Making Electrical Re-sources the Right Size, 2002, Rocky Mountain Institute (Snowmass CO), www.smallisprofitable.org.
24. For windpower in the three power pools that span the central U.S. from Canada to Texas: J.

-
- Traube, L. Hansen, B. Palmintier, & J. Levine, "Spatial Interactions of Wind and Solar in the Next Generation Utility," Windpower 2008, 3 Jun 2008 (to be posted shortly at ert.rmi.org).
25. E.g., an integrated retrofit of efficiency, demand response, and 1.18 MW of PVs at the Santa Rita Jail in Alameda County CA easily met a 10%/y IRR hurdle rate—the \$9-million project achieved a present-valued 25-year benefit of \$15 million and hence would have made money even without its \$4-million state subsidies—because on the hot afternoons when the PVs produced the most power, the efficient jail used little, leaving a bigger surplus to resell to the grid at the best price. Or my own household can run on ~120 average W (a tenth the U.S. norm), obtainable from 3 m² of PVs—a system cheaper than connecting to wires 30 m away. If built today, my household would need only ~40 average W, from 1 m² of PVs—a system cheaper than connecting to wires already on the side of the house. Both these comparisons assume free electricity; their point is that superefficient end-use can make the breakeven distance to the grid, beyond which it's cheaper to go solar than to connect, drop to about zero.
 26. 私たちはここでは、どんな発電機を建設するのにも必要となる少量の大体同じレベルのエネルギーは計算に入れていない。また、核関連の廃止措置や廃棄物管理、低品位の資源からのウランの抽出、採掘後の土地の修復の費用も入れていない。K. Sovacool, *En. Pol.* 36:2490–2953 (Aug 2008) がこれらの問題を研究している。彼は、原子力のエネルギー・インプットと間接的炭素放出に関して発行されている 103 の研究を検討した。10 年以上経っているもの、英語でないもの、透明でないものを除いた結果、残りの 19 は、gCO₂e/busbar kWh 値が 14~18 で、平均は 66 だった。これは、複合サイクル・ガスの炭素強度の約 7 分の 1 だが、太陽電池の 2 倍、そして、最近の陸上風力の 7 倍である。しかし、この比較、あるいは、A・B・ロビンズと J・プライスが 1977 年に説明した、もっと不利な同様のデータ(Non-Nuclear Futures, Ballinger, Cambridge MA, Part II) は、ここではほとんど関係ないと言っていいだろう。なぜなら、この章で示した否定のしようのない経済的機会コストの方がずっと重要で明確だからである。
 28. Since its recovered heat displaces boiler fuel, cogeneration displaces more carbon emissions per kilowatt-hour than a large gas-fired power plant does.
 29. しかしここで想定されたのより低い長期的天然ガス価格 (100 万 BTU 当たり 2007 年均等化ドル・コスト 7.72) 及び今日の高い原子力コストを使うと、複合サイクル発電所は、ドル当たりにして、原子力より多くの炭素を削減できるかもしれない。これは、ここで想定されている価格でも言えるかもしれない。それは、複合サイクル発電所の負荷追従運転能力 [出力調整運転] を適切に考慮した場合である。この能力により、複合サイクル発電所は、風力のような、よりクリーンで安い変動型再生可能エネルギー源を補完し、その利用を可能にする。
 34. 原子力産業は、現代の経済は非常に信頼性のある電力を必要とするから、1 日 24 時間・週 7 日運転され続ける 10 億ワット規模の発電所を複数持たなければならないと言うが、この主張はばかげている。どんな電力源も 100%の信頼性は持てない。予測不能の運転停止は、その発電ユニットが大ききものである場合、とりわけ損害は大きい。だから、電力会社は、予測不能の運転停止があっても信頼性のある電力供給を保証するために、余剰性をもち、複雑な運転技術を使う。同じ実証済みの技術が、変動要因が簡単に予測できる種々の再生可能エネルギー源を多数使っている場合にも、同様のことが適用される。しかし、それは、ずっと容易である。200 以上の国際的研究及び 11 の米国の研究がこれを例外なく明らかにしている (ref.1 (pp22-27) 参照)。ドイツ、スペイン、デンマークの風が多い地域は、すでにこれを証明している。年間の電力需要全体の 20–39% (そして時には地域の需要の 100%以上) を、再生可能エネルギー源で、不安定性やさしたる統合コストも伴うことなく、提供しているのである。
 35. New Energy Finance found only a 4% drop in 3Q08 renewables financing, and recent data suggest a robust, even growing, solar sector despite grave financial distress and accelerating decline in the central-station business.
 36. A thorough database of industry and official data sources is posted and updated at www.rmi.org/sitepages/pid256.php#E05-04. Similar renewable energy data are at www.ren21.net.
 37. A policy agenda for removing many of these obstacles is in the last section of *Small Is Profitable* (ref. 31).
 38. Data for decentralized gas turbines and diesel generators exclude generators of less than 1 megawatt capacity.
 39. O. Bailey and E. Worrell, "Clean Energy Technologies: A Preliminary Inventory of the Potential for Electricity Generation," LBNL-57451, Apr 2005, <http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-57451/>.
 41. All documented in ref. 1.
 42. A.B. and L.H. Lovins and L. Ross, "Nuclear power and nuclear bombs," *Foreign Affairs*