

低炭素社会実現の 鍵を握る原子力発電

電力中央研究所「電気と環境のフォーラム」



長野 浩司

電力中央研究所 社会経済研究所 上席研究員。エネルギー及び原子力システムの技術経済分析、原子力政策の研究に従事。



安尾 明

電力中央研究所 原子力技術研究所 発電基盤技術領域リーダー 上席研究員。原子炉プラント内の伝熱・流動・振動の研究および軽水炉発電システムの研究開発に従事。

1 低炭素社会を担う 原子力の役割

これまでの連載で、低炭素社会の実現には、①省エネルギー、②電化の推進、③低炭素排出電源の利用が柱になることを述べてきた。このうち、低炭素排出電源の利用では、本連載記事の第1回（本誌11月号）で述べたように、原子力発電、バイオマス発電、太陽光、CO₂回収貯留（CCS）と組み合わせた火力発電など、低炭素排出電源の大幅な拡大、高効率化などによる火力発電のCO₂排出原単位の改善が必要である。

このうち、バイオマス発電、CCSと組み合わせた火力発電は、「Cool Earthエネルギー技術革新計画」の下、官民挙げての研究開発がなされているが、まだ技術的に未成熟であり、どの程度まで大規模に発電に寄与するか明らかでない。なお、CCS技術の現状と発電分野への応用における課題については、本連載の第3回（本誌1月号）を参照されたい。一方、太陽光発電は技術開発によって製造コストの低減が図られ、家庭や産業での導入が進められている。しかし、今後導入量の飛躍的な拡大が期待されるものの、本稿では、

天候影響による稼働の間欠性や土地利用上の用途競合などの特質のため、日本社会全体としてのCO₂排出削減への寄与は限定的なものにとどまると、いわば「安全側」に捉えておく。現時点では、原子力発電のみが、大容量の電力供給が可能な低炭素排出電源であり、低炭素社会実現への鍵を握っていると考えられる。

原子力のもうひとつの大きな特徴は、燃料供給の安定性に優れること、すなわちエネルギーセキュリティ確保への貢献である。原子力は、発電コストに占めるウラン購入費の比率が小さく（約3%、

火力発電で燃料費は50～60%）、よって燃料価格の変動に対する耐性が高い。しかも、天然ウラン資源の調達先も石油と比較してより政情の安定した諸国に適度に分散している。電力中央研究所（以下、電中研）では、エネルギー資源調達の安定性を、世界の資源埋蔵の集中度、日本の燃料調達先の集中度、政情安定度などに基づいて定量的に評価した結果、原子力（ウラン）の調達リスクが石油に対して低く、入手の安定性に優れていることが示された（図1、発電時CO₂排出原単位と併せて図示している[1][2]）。これは、原子力な

どによる石油代替の着実な進展により、わが国のエネルギーセキュリティが1970年代の石油危機当時から大きく改善してきたこととの傍証といえる。以上から、原子力は大容量の低炭素排出電源として、「地球環境問題への対応」と「エネルギーセキュリティ確保」の両立に大きなポテンシャルを有していると言える。

わが国の商業用原子力発電所はすべて軽水炉であり、2009年1月末現在で53基（08年12月22日

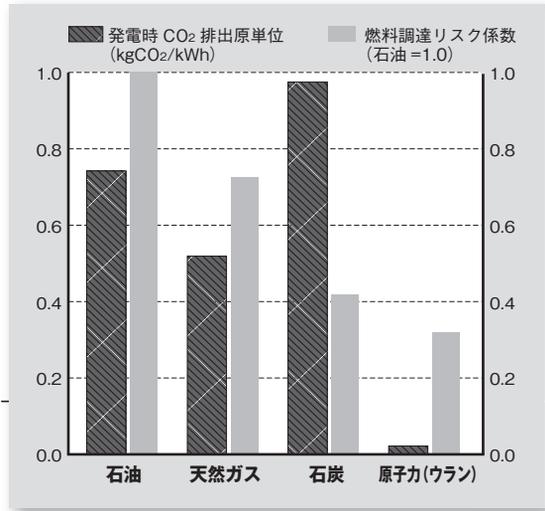


図1 電源間の燃料供給安定性・CO₂排出原単位の比較 [1] [2] 燃料調達リスク係数は、以下の要素を勘案して算出し、石油 (=1.0) で規格化して表示している。

- ①世界の燃料供給における市場支配力の集中
 - ・資源埋蔵量の特定国・地域への集中度（地域毎の資源埋蔵量の偏りに、当該国・地域の社会的経済的不安定度を加味）
 - ・世界貿易の特定国・地域への集中度（地域毎の輸出量の偏りに、当該国・地域の社会的経済的不安定度を加味）
 - ②わが国輸入の特定国・地域への集中度（地域毎の輸入量に、当該国・地域の社会的経済的不安定度を加味）
- 評価における地域区分は8地域（北米、中南米、欧州、旧ソ連、中東、アフリカ、アジア、太平洋）とした。各国・地域の社会的経済的不安定度は、(独)日本貿易保険による国の格付けに基づき10段階（0.1から1.0）で評価した。

に運転終了が公表[3]された中部電力浜岡原子力発電所1、2号機を除く基数)、合計4794万kWの発電プラントが運転中(点検のため停止中も含む)で、近年、わが国の総発電電力量の約3分の1を供給している(ただし、07年度は新潟県中越沖地震の影響から、総発電電力量に占める原子力発電比率が26%にとどまった)。さらに、新たに3基、合計367万kWが建設中であり、加えて12基、合計1655万kWの開発計画(1、

2号機の停止と併せて公表された浜岡6号機(140万kW級)[3]、および九州電力川内3号機[4]を含む)がある。原子力委員会が05年10月に策定した「原子力政策大綱」では、安全の確保を前提に「30年以後も総発電電力量の30%程度という現在の水準か、それ以上の供給割合を原子力発電が担うことを目指す」としている。この基本方針は、07年3月に改定された「エネルギー基本計画」においても尊重することとされている。

本連載の第1回で、低炭素社会実現のために、原子力がCO₂排出量の60%削減の主役を担うと仮定した試算を行った。その結果、目標達成に必要な無炭素電源の寄与を原子力発電で達成する場合、原子力に求められる貢献は「50年までに原子力発電のエネルギー生産量を倍増させること」、すなわち現在の設備容量(4794万kW)に対して9000万kW(設備利用率90%を前提、設備利用率80%であれば10000万kW)に相当することを示した。もちろん、

ん、ほかの無炭素電源の貢献があれば、その分だけ原子力の貢献度は低くてよいが、本稿では、仮に9000万kWの実現が必要とされたときに、それは果たして可能だろうか、また、その着実な実現に向けて克服していくべき課題には何があるだろうか、という視点で考察を進める。

2 原子力発電の利用拡大に向けた課題

(1) 既設炉の活用

原子力発電が今後さらに大きな役割を担っていくためには、既存設備の最大限の活用が前提となる。このために、以下に示す4つの課題に対し可能な限りの改善を図っていく必要がある。

設備利用率の向上

わが国の原子力発電プラントの設備利用率は、検査制度の違いなどに起因して米国などと比べて低く、特に07年には、同年7月16日に発生した新潟県中越沖地震による東京電力柏崎刈羽原子力発電所の停止の影響もあり、全プラント

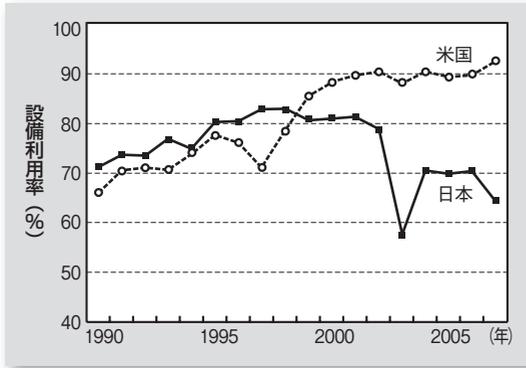


図2 日・米における原子力発電の設備利用率[5]

平均利用率は60%台に低下した(図2)。このことが、上に述べた原子力による発電電力量割合の一时的な落ち込みをもたらした。

一方、米国における設備利用率向上には、90年代に米国原子力規制委員会(NRC)が導入した発電所保守の新たなルールが果たした役割が大きい。このルールでは、

確率的リスク評価の結果を利用して機器やシステムを安全上重要な順番にランク付けし、これに基づいて重点的に保守を行なうこととした。この結果、設備利用率の向上と併せて、計画外停止頻度の減少など安全性の向上が図られた。このような米国の発電設備運用の効率化への取り組みも参考に、わが国においても原子力発電所の検査制度の見直しが行なわれ、新しい検査制度の下に原子炉の保全活動が実施されることになった[6]。

この新しい保全活動では、プラントごとの特性を踏まえた点検、補修、取り替えなどが行なわれることになり、日常の保全活動を充実させることによって、これまで13カ月を超えない範囲で義務付けられていた定期検査の間隔について、安全性を損なうことなく米国や欧州主要国で標準となつている24カ月以内で最適な点検周期を柔軟かつ機動的に設定できる道が開かれた。また今後、プラントのリスク情報を利用することにより、運転中に保守作業ができる機器の範囲

が広がり、プラントの総合的な安全性をより高い水準に保ちつつ、検査によるプラントの停止期間を短縮できる可能性もある。これらの施策を講じることにより、既存軽水炉の設備利用率を中長期的に90%にまで高めていくことは充分に可能であると考えられる。なお、ここでは『原子力のエネルギー生産量の増大』を主眼に論じたが、以上の施策の結果として大きな追加費用なしに設備利用率の向上(および次項に示す出力向上)が実現されれば、原子力発電の経済性の向上にも寄与することを付言しておく。

出力向上

米国における既設軽水炉活用の改善に向けた努力は、設備利用率の向上にとどまらない。近年、同国では、原子炉の裕度を活用し、下記の方法によつて、既存軽水炉からより多くの電気出力を得る取り組み(出力向上)を進めている。第1は給水流量計などの測定精度を改善することで、従来の安全解析で見込まれていた計測不確かさを

小さくする方法(2%程度向上)、第2は安全解析などの精度を向上させた再評価による方法(7~8%程度向上)、第3は蒸気タービン、復水ポンプやモーター、主発電機など個別機器の改造による方法(これまで約20%の向上まで認可実績あり)などである。米国内の103基の原子炉に対し、これまでに100万kWの原子炉を新しく5基建設したことに相当する累計522万kWの出力向上を行なうとともに、現在さらに計91万kWの出力向上についての安全審査を行つている[7]。わが国でも、同様の取り組みがようやく本格化してきており、原子力学会においてその導入にかかわる技術課題の取りまとめが行われるなど、具体的な計画と実現が期待される。

経年軽水炉の長期安定運転

運転開始から相当の年数が経過した軽水炉(経年軽水炉)を安定して継続稼働させることも、重要な課題である。わが国で初期に建設された軽水炉で、既に30年以上の運転を経過して使用されている

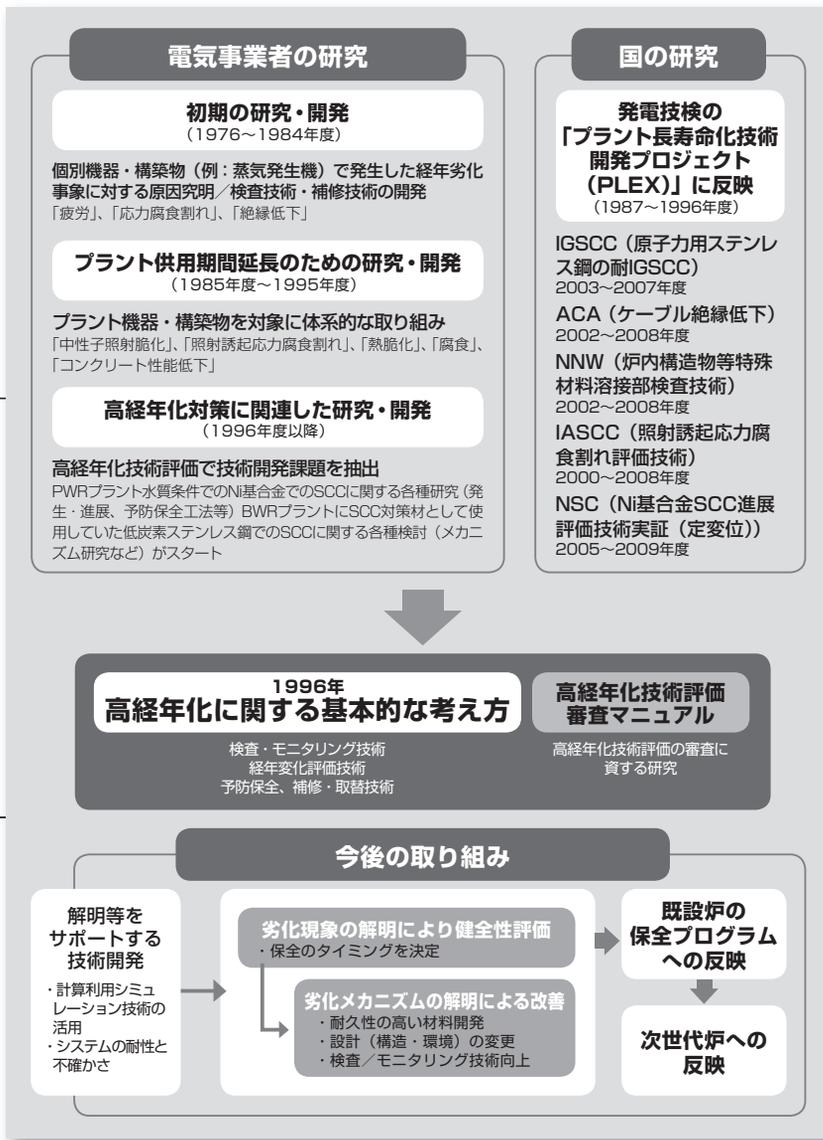


図3 高経年化対策研究の歩みと今後の展開 [8]

経年軽水炉数は08年末までに15基あるが、これが10年には18基に達し、今後も経年軽水炉の累積基数が次第に増加する。こうした状況への対応のため、既にさまざまな技術課題の存在が認識されており、

国、大学、産業界の各方面で、技術的対策・措置の研究開発が進められ、研究成果を取り入れた規格・基準類の策定が国内学協会において進められている（図3）。このうち電中研では、産業界の

ロードマップに基づいて発電所現場と連携し、原子炉の最重要機器である圧力容器材料の中性子による経年変化（脆化）予測法の開発など、機器・材料の長期健全性を科学的合理的に評価する手法の開

発・実証と、この成果を軽水炉の長期利用に活用していくための研究開発を進めている。これら施策を着実に進めることにより、既設原子炉の性能を適切に維持しつつ、50～60年以上の長期にわたる運転継続が可能となる。

既設炉の安定運転に対する制度面からの支援

以上に述べた技術面の課題にかかわる努力を円滑に実施していく上で、これを支援する法制度面での整備を併せて遅滞なく図っていく必要がある。設備利用率向上で言及した検査制度の見直しはこの面での大きな前進である。出力向上などの設備の更新を伴う施策についても、その審査において事業者・規制当局双方に大きな負担を生じさせることのないよう、リスク情報の活用などを制度的に担保していくなど、既設炉活用にかかわる技術的な検討成果を法制度に適切、迅速に反映する措置を講じていくべきである。これらの例を含めて、既設発電所の運用改善につながる法規制制度の在り方につ

いて、透明性を持った検討を進め、その結果を逐次実現していくことが急務である。

これらの事項に対する取り組みにより、上述の開発計画分以外の新規建設がないとしても、50年時点で91年以降に運転開始した3800万kWに加えて出力向上分が供用されることになる。出力向上の寄与を見込まないとしても、本稿の検討において仮定した設備容量9000万kWのうち42%程度以上を既設軽水炉（開発計画に基づく建設分含む）で担うことが可能である。その一方で、なお不足する最大5200万kW（出力向上の寄与があればその分だけ少なくて済む）について、新規建設（既設炉のリプレース建設を含む）による補完増強を図っていかざるを得ない。その実現のための課題としては、何があるだろうか。

（2）新規炉の着実な建設

新規の原子力プラント建設に向けては、既設炉の廃止措置およびその跡地再利用のための技術（リ

プレース技術）開発や、現行の軽水炉よりさらに安全性と経済性を高めた次世代の軽水炉開発などが進められている。リプレース技術や将来建設されるにふさわしい原子炉の設計や技術課題などについては、連載第8回（本誌6月号）で論じることとするが、ここでは、今後原子力プラントが順調に建設されていくための条件として、以下の2点を強調したい。

新・増設のリードタイムの短縮

原子力発電所の新規建設、増設あるいはリプレースには、計画から建設を経て運転開始に至るまで長いリードタイムを伴う。その中で、許認可手続きに要する時間も無視できない要素であり、その合理化による所要時間短縮が望まれる。既存サイトにおける増設ないしリプレースについては、米国で採用されている「建設運転一括許認可（Combined Construction and Operating License：COOL）」制度などの活用など、手続きの簡素化を図る余地がある。また、新規サイトについては、

COOLと同様に制度化されている「標準型炉の設計認証（Advanced Design Certification）」や「事前サイト許可（Early Site Permit）」などの仕組みを取り入れることが考えられる。

投資の円滑化などの政策的支援

原子力発電は、全発電期間を通算すれば、他電源に比べて良好な経済性を有することが知られている。その一方で、資本集約的な性質のため、初期投資（減価償却）や廃止措置時など一時的に大きな資金負担を生じ、特に複数の原子炉の設置や廃止が同時に発生するような場合には収支上大きな影響を及ぼし得るため、米国などでは負担の軽減・平準化のための法的な措置が採られている。日本でも、例えば核燃料サイクルの各段階、あるいは遠隔立地に伴う長距離送電線や連絡線の設置など、原子力の円滑な拡大を阻害する要因があれば、それらの除去軽減に意を払う必要がある。現在、そうした政策的な支援の枠組み作りが進んでいる^[9]。

（3）核燃料サイクルの確立と「エネルギー生産量倍増シナリオ」に向けた展開

原子力が長期にわたってエネルギー供給を行うことを可能とする前提条件として、核燃料サイクルの確立が必要である。使用済み燃料を再処理し核燃料をリサイクル利用する活動は、供給安定性に優れているという原子力発電の特性を一層向上させると同時に、既存原子力プラントの有効利用および新規建設を支えるものとなる。その意味で、まず日本原燃六ヶ所再処理施設の運転開始、プルサーマルの着実な実施、そして高レベル放射性廃棄物処分場立地点選定の道を開くことの重要性は言を待たない。さらに、本稿で論じている「CO₂排出大規模削減への原子力の貢献」すなわち「原子力のエネルギー生産量倍増」シナリオの実現を想定すれば、現状の原子力発電設備の2倍近い設備容量に対して十分な燃料供給および廃棄物処理サービスの提供を可能とす

るための検討も重要であり、ここでは特に以下の2点を挙げる。

第1の課題は、フロントエンドの競争力の向上である。対カザフスタンなど、近年日本は資源外交に力を入れて取り組んでおり、天然ウラン権益確保も明確に課題として取り上げられている。これを一層強化推進していくことが求められる。他方、ウラン濃縮についても、仏AREVA、露ROSNATOM、米USECなど外国の濃縮事業者の動向やそれらの間の国際競争をも視野に入れながら、原子力という準国産エネルギー源の供給の要としての位置付けを戦略的に確立していく取り組みが求められる。

第2の課題は、使用済み燃料対策である。六ヶ所再処理施設の順調な稼働と、青森県むつ市に建設中のリサイクル燃料貯蔵のリサイクル燃料備蓄センターなどの整備により、現状の原子力発電設備からの使用済み燃料発生量(年900t程度)に対処するという現在の計画を着実に進めることを前提

に、将来的には、第2再処理工場の設置や、使用済み燃料の中間貯蔵容量の柔軟かつ機動的な拡充を進める必要も生じる。これらの取り組みにより、「エネルギー生産量倍増シナリオ」で(燃料の高燃焼度化などの効率化があったとしても)2倍近い量が想定される使用済み燃料発生に適時的確に対応することも可能になる。再処理容量の増加については次世代の再処理技術も視野に入れた検討を、貯蔵容量の拡充については原子力発電サイトにおける貯蔵の機動的な採用も図っていくべきであろう。

3 原子力政策と社会合意

これまで述べた既設炉の活用、新規炉建設の両面の努力が順調に実れば、CO₂排出量の60%削減に向けて冒頭に掲げた「原子力のエネルギー生産量倍増」の実現も決して不可能ではない。ただし、その確実な実現に向けては、これまで述べた課題だけでなく、原子力発電の健全な運用を阻害し得

る、社会から見た原子力利用の継続、増進に対する合意形成や制度的担保にかかわる諸課題にも、これまで以上に配慮した上で進めていかなければならない。

地方分権化時代での役割分担

地球温暖化問題に対する国民意識の高まりから、原子力発電所の必要性に対する認識が着実に高くなってきているもの、安全性を懸念する人の割合は半数を超えている[10]。そうした国民感情に加えて、今後、地方分権化の進展に伴い、原子力政策の立案・実施においては、広範な利害関係者の参画を得ながら、社会情勢の変化を見極めつつ、柔軟な修正が要求されていくことが予想される。更なる市町村合併など地域主権型の分権化の進展が、原子力政策が国の専権事項(注1)とされていることとの間に矛盾や相克を生むことがないか(注2)、原子力政策の立案・実施における国と基礎自治体との間の関係性や役割分担について、その時々々の民意も的確に反映しつつ、真剣に考え、探り続ける努力が求

められている。

社会的リスク管理への対応

新潟県中越沖地震では、原子炉安全に影響する被害は発生しなかったものの、原子力の地震リスクが世間の耳目を集め、耐震安全性を含む原子力安全規制への社会的な関心が高まった。これを機会に、今後原子力利用を拡大していくためには、安全規制活動の合理性、透明性を高めていくこと、また原子力事業者は組織リスク管理活動を強化していくことが、社会の理解促進の点からも重要である。

国際規範への対応

本稿で想定した「原子力の温暖化防止への貢献」への期待、あるいは世界的な「原子力ルネッサンス」の潮流の下で、国際社会での原子力の重要性の認識が高まっており、その具体的な活用が各国で検討されている。このような中では、わが国の規制や法制なども、国際規範との整合性を持つていなければならない。現在のところ、わが国では、核拡散防止条約(NPT)に基づいて、国際原子

力機関（IAEA）の保障措置の下に、核物質や機微な技術・施設は国際的に最高水準の管理の下にある。しかしながら、いわゆる「9・11」以降の国際情勢の変化により、民生用の原子力施設における（物質のみならず、情報なども対象とする）核セキュリティ全般に対する要求への対応は、一層厳しく求められるようになってきている。現在の核物質の管理水準を今後とも堅持しつつ、核不拡散の強化や核物質・技術の多国間管理構想など、国際機関を中心に進行中の議論の動向を注視し、適切かつ先取的に対応していく必要がある。

4 社会から選びとられるエネルギー源で在り続けるために

本稿では、低炭素社会実現に向け、その鍵を握る原子力発電に期待される役割と課題について述べた。現状において、大容量の電力供給が可能な低炭素排出電源である原子力発電への期待は極めて大きい。しかし、原子力発電容量の確保・増大のためには、高経年炉

対策などの技術課題のほかに、ほかの低炭素排出電源にはない政治・経済、社会面での特有の課題とリスクが存在し、その一つひとつの課題克服には多大な時間と努力を要する。計画から現実のものになるまでリードタイムが長い原子力発電が、目標として設定された時点においてどの程度の役割を果たせるかは、社会からの安定した支持を得られるか否かにかかっている。そのためには、何よりも本稿で論じたように、あらゆる局面において「原子力の競争力を向上させていく」必要がある。原子力が競争力あるエネルギー源として確立していることを前提に、社会情勢の変化を読み誤ったり乗り遅れたりすることなく真摯に社会に向き合い、低炭素社会実現に向けた幅広い選択肢を含めて技術的情報を分かりやすく伝えつつ、社会から選び取られるエネルギー源で在り続けるための努力を重ねていかなければならない。

参考文献

- [1] 長野 他、「原子力の燃料供給安定性の定量的評価」、電中研研究報告Y07008（2008）
- [2] 本藤 他、「ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価―最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響―」、電中研研究報告Y99009（1999）
- [3] 中部電力株式会社「浜岡原子力発電所リプレース計画等について」平成20年12月22日。 <http://www.chuden.co.jp/ICSFiles/afidfile/2008/12/22/hamaoka.pdf>
- [4] 九州電力株式会社「川内原子力発電所における環境調査結果の報告及び川内原子力発電所3号機の増設申入れについて」平成21年1月8日。 http://www.kyuden.co.jp/press_090108-1.html
- [5] 米国・NEEIインダストリーデータ、日本・原子力産業協会データ集
- [6] 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会検査の在り方に関する検討会報告書（2006）
- [7] 米国NRCホームページ（2008）
- [8] 電気事業連合会他、「産業界におけるPLM研究推進会議の取り組み」、安全フォーラム（2007）
- [9] 総合資源エネルギー調査会電気事業分科会「原子力発電投資環境整備小委員会報告書（2007）」
- [10] 第18回エネルギーに関する世論調査、社会経済生産本部（2004）

注1・原子力委員会および原子力安全委員会設置法（昭和三十年十二月十九日法律第百八十八号）第二条「原子力委員会（以下この章において「委員会」という。）は、次の各号に掲げる事項について企画し、審議し、および決定する。一、原子力利用に関する政策に関すること。（以下略）注2・通例では「国の専権事項」としては外交、安全保障などが挙げられ、原子力政策にも施設設置の許認可などの他に、核不拡散など本来的に専権事項であるべき要素が多く含まれることも事実である。他方、あえて例を挙げれば、原子力事業者と地元の間、発電所所在市町村、隣接市町村の間で締結される「安全協定」や、地方税としての核燃料税などは、国の政策範囲としては別個の措置として実施されている。