

石炭火力のエコロジーと エコノミーの両立

京都産業大学 上田研究会

農業・環境分科会

奥村 俊宏

2014年11月

要約

第 1 章において、現在の火力発電の現状と問題について検討する。続いて第 2 章で火力発電の中の石炭火力に焦点を当てて、メリットやデメリットを確認する。第 3 章では、先行研究として石炭火力以外の発電、例えば再生可能エネルギーや原子力発電等の論文を考察し石炭火力と比較をする。第 4 章では、石炭火力の現在行われている研究や技術について考察し、CO₂ 排出量の問題から京都議定書、排出権等についても考察する。そして、第 5 章ではまとめとして、石炭火力発電のエコロジーとエコノミーについて政策提言を行う。

目次

はじめに

第1章 火力発電の現状と問題

第2章 石炭火力発電

- 第1節 発電コストと埋蔵量
- 第2節 世界の石炭火力の使用割合
- 第3節 CO₂ 排出量が最も多い

第3章 先行研究

第4章 現状分析

第5章 政策提言

先行論文・参考文献・データ出典

はじめに

2010年3月11日、東日本大震災が起こった。そこで、福島第一原子力発電所の事故が起こった。その事故によってほとんどの原子力発電所を停止する方向となった。

原子力発電所の事故以前、日本は火力発電所の使用を少なくしようとしていた。理由は、地球温暖化の原因である二酸化炭素排出の対策である。対策としては省エネルギーや再生可能エネルギー、原子力発電などのクリーンエネルギーがある。省エネルギーはつい先日までよく耳にした「エコ」と言う言葉が流行していた。ほとんどの電化製品やキャッチコピーとして「エコ～」が使われていた。他にクリーンエネルギーである再生可能エネルギーには、太陽光、水力、風力、地熱などがあり、今でもなお注目されているのはソーラーパネルやエネファームなどである。例えば、企業が制作するメガソーラーは設置する際かなりの費用が必要となり、一般家庭で使用されるソーラーパネルもまだ費用が高い問題がある。エネファームは場合、一般家庭で使用する分はそれほど良い発電というわけでもなく、またソーラーパネルの設置料金より費用が高いなど問題がある。よって、まだそこまで世間には広まっていない。しかし、対策としては様々な対策がなされている。

他の対策としては原子力発電を推奨することもあった。発電の中で最も二酸化炭素を排出するのは火力発電である。二酸化炭素を排出する火力発電を、二酸化炭素を排出しない原子力発電にシフトすることで二酸化炭素排出対策ができると考えられていた。しかし、原子力発電にシフトしている最中に原子力発電所の事故は起こった。この事故により、そこまでの危険性はないとされていた原子力発電は最も危険な発電だと証明された。よって、原子力発電の停止が推奨される形となった。日本はまだ再生可能エネルギーが完成していなかったことから、火力発電に頼るしかなかった。福島第一原子力発電所の事故以降、日本は火力発電に頼り始める。現在稼働している火力発電所に加え、停止していた火力発電所も再稼働することとなった。中には一見すると、もう稼働しそうでないと感じるような激しく老朽化している発電所も稼働している。多くの発電所を稼働させ、火力発電は日本の発電のほとんどを占めている。

二酸化炭素の排出量削減のために試行錯誤していた日本は原子力発電所の事故により大きな打撃を受け二酸化炭素排出量の削減が滞っている。逆に火力発電の大幅な増加により二酸化炭素の排出量は大幅に増加している。そのことから、私たちは火力発電に焦点を当て、どのような二酸化炭素排出量の削減をするか検討する。

私たちは本稿において、日本のエネルギー問題、CO₂ 排出問題についてどのような発電、対策をすればいいか、考慮していく。本稿の構成は以下の通りである。

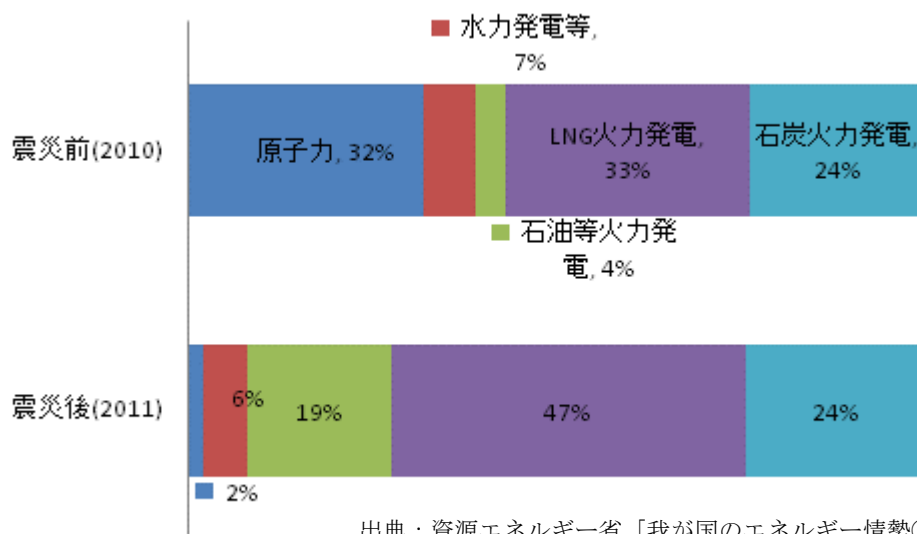
まず、第1章において、現在の火力発電の現状と問題について検討する。続いて第2章で火力発電の中の石炭火力に焦点を当てて、メリットやデメリットを確認する。第3章では、先行研究として石炭火力以外の発電、例えば再生可能エネルギーや原子力発電等の論文を考察し石炭火力と比較をする。第4章では、石炭火力の現在行われている研究や技術について考察し、CO₂ 排出量の問題から京都議定書、排出権等についても考察する。そして、第5章ではまとめとして、石炭火力発電のエコロジーとエコノミーについて政策提言を行う。

第1章 火力発電の現状と問題

東日本大震災での福島第一原子力発電所の事故によって、日本は現在、原子力発電の利用を減らし始めている。原子力発電が減少したことにより、火力発電に依存することとなった。当時使用されていた火力発電所に加え、停止していた火力発電も再稼働させ、フル出力で稼働させている。その結果、震災前と震災後では使用されている発電が大きく変化した。震災前には32%もあった原子力発電は、震災後には2%まで減少し、ほとんど使用されていないと言っても良い状況である。原子力発電の利用減少によって火力発電の使用割合は、震災前に61%ほどあったのが震災後に90%まで大きく増加している。つまり、現在の発電はほとんど火力発電で支えられていると言える。火力発電の利用増大の理由としては、原子力発電の穴埋めだと考える。現状、発電所の事故による原子力発電所の減少。これまで使用されていなかった火力発電所を再稼働。これが原子力発電の減少した分を埋めるかのように火力発電を使用しているように見える。特に再稼働した古い火力発電所の安全性はどうなのか。原子力発電よりかは事故が起こった場合、周りの被害は少ないとなっているが、被害レベルはどのようになっているのかも問題となっている。

現在、火力発電で使用されている化石燃料は石油、ガス、石炭である。図1は日本の2010年と2011年での発電構成の比較を表したグラフである。図1を参照するし、化石燃料の3つの使用割合を震災前と震災後で見比べてみると、石油は7%から19%へ、天然(LNG)ガスは33%から47%へ増加している。しかし、石炭のみ24%のまま増加も減少もしていない。なぜ石炭は増加していないのか。その理由としては、CO₂排出量が化石燃料の中で最も多いからだと考えられる。

図1、発電構成の比較



ここで火力発電には大きな問題が2つある。一つ目の問題としては地球温暖化の原因である温室効果ガスのCO₂を排出することである。水力発電、風力発電等の再生可能エネルギーや原子力発電からはCO₂は排出されない。原子力発電の使用減少により、61%から90%に増加した火力発電によってCO₂は29%ほど排出量が増加していると考えられる。つまり地球温暖化が深刻化する可能性がある。二つ目の問題点として、火力発電は原子力発電より発電コストが高いことである。特に10%使用増加している石油は化石燃料の中で最もコストが高い燃料である。LNGガスも他の2つの燃料よりコストは低いが、原子力と比べるとやはりコストは高い。石炭は最もコストが安価であるがほとんど使用増加の傾向がない。つまり、輸入する化石燃料を使用することで、貿易赤字を招き国富が流出する。加えて、国内の発電コストが増加し、電気料金が高騰している。

この二つの問題があるが、現状日本は火力発電に頼らなければならない。このことから、火力発電の早急な対策をしなければならない。発電の使用が最も多い燃料である天然ガスはこのままでもCO₂排出量、発電コスト等の問題はあまりなく、使用し続けても良いと考えられる。しかし、石油と石炭はコストまたはCO₂排出量にそれぞれ問題がある。このことから、天然ガスの使用増加はこのまま様子見をし、石油と石炭に焦点を当てるべきだと考える。そこで私たちはCO₂排出量が最も多く、コストが最も安い石炭に焦点を当てる。

第2章 石炭火力発電

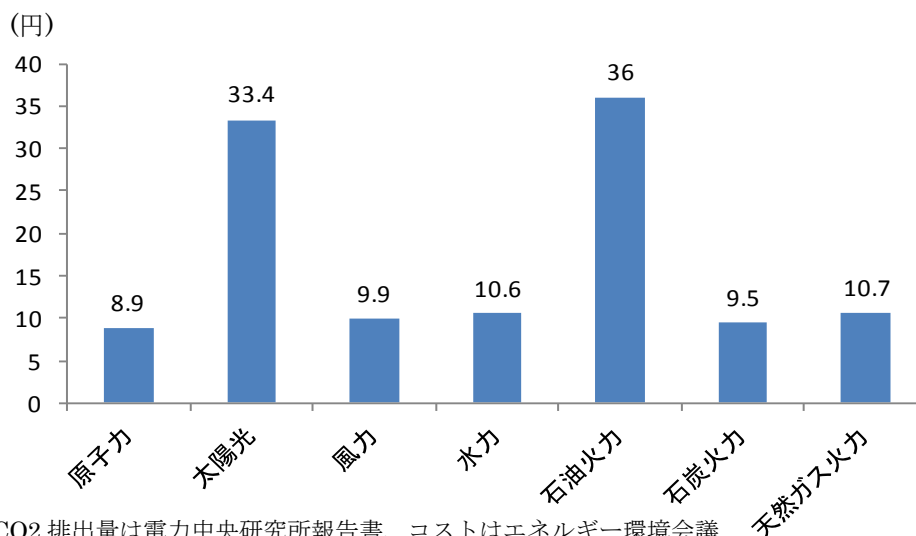
石炭に焦点を当てる理由は3つある。1つ目に石炭火力発電のコストが最も安価であることと、化石燃料の中で最も埋蔵量が多いこと。2つ目に世界の化石燃料の中で最も使用割合が多いことである。3つ目に地球温暖化の原因のCO₂排出量が化石燃料の中で最も多いこと。

第1節 発電コストと埋蔵量

この節では、石炭火力発電のメリットについて考える。メリットとしては、発電コストと埋蔵量が他の化石燃料より優位性を持っていることである。

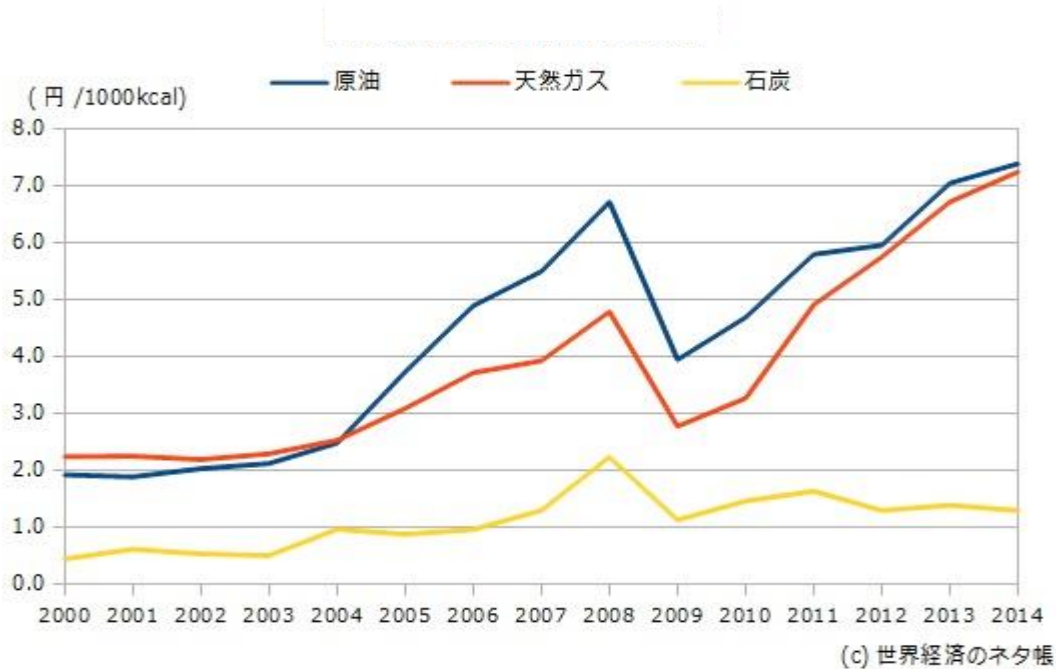
1つ目に石炭火力発電のコストが最も安価であることについてである。図1は1kwh当たりの発電コストについてグラフに表したものである。図1を参照すると、石炭の発電コストは2011年で9.5円となっている。これは原子力発電のコストよりは高いが、他の主な発電の中では最も安価となっている。火力発電に頼る中、原子力発電の使用が減少することによって、電気料金は高くなっていくだろう。実際に火力発電が主流になったことで電気料金は値上がりしている。図2では、化石燃料の国際価格の推移についてグラフに表している。図2を参照すると、石炭の原価はどの化石燃料よりも格段に安い。2009年から2014年の6年間では2008年より価格が高くなっておらず、全体を通してみると価格の変動は少ないことがわかる。つまり、石炭は安定している燃料だと考えられる。これらをふまえて、化石燃料の中で最も発電コストの低い石炭を使用することで、電気料金の値上がりを抑えることができるのではないかと考える。実際、電気料金の値上がりの理由として、29%ほど増加している火力発電の使用で特に石油の4%から19%の増加はかなり電気料金の高騰化につながっていると考えられる。

図1. 1kwh当たりの発電コスト (2011年)



・CO₂排出量は電力中央研究所報告書、コストはエネルギー環境会議コスト等検証委員会報告書(2011)を元に作成

図 2. 化石燃料の国際価格の推移



2つ目に、化石燃料の中で最も埋蔵量が多いことについてである。化石燃料の埋蔵量については、大きな問題となっている。2013年の統計では石油 1.67 兆バレル (52.9 年分)、天然ガス 187 兆 m^3 (55.7 年分)、石炭 8609 億トン (109 年分) となっている。つまり、石炭は他の2つの燃料の2倍近く残っている。石油は近々枯渇する等と言われている時もあったが、実際は枯渇するのはまだまだ先だと言う説もある。だが、化石燃料の埋蔵量についての問題が大きくなっていることから、どの化石燃料を主に使用するか入念に考えなければならない。日本では石油や天然ガスの埋蔵量は見込めないが、石炭はまだあると聞く。輸入に頼らずに自国のみで火力発電は賄えないと思うが、自国にある資源がまだ使用することができるのであれば自国での石炭の確保を視野に入れる事も重要だと考える。

この埋蔵量についての問題はコストの問題にも繋がる。石油と天然ガスの原価は石炭よりもはるかに高い。これは石油も天然ガスも石炭の 1/2 しか埋蔵量がない。すると量が少ないほうに希少性がつき、必然的に石炭より価格が高くなる。もし石炭が他の燃料より埋蔵量が少なければ、今のままで良いのだが、日本はわざわざ価格が高い方の燃料を使用している。それに加え、自国で燃料を確保する手段がなく輸入にたより、なおかつ石油と天然ガスに依存するという事は、海外の市場で足元を見られ、より価格が高くなる可能性もある。実際アメリカが売買している石油の価格と日本の石油の価格と比較すると、資源エネルギー庁より 2012 年比では、日本 1 バレル 114.8 ドルに対しアメリカ 1 バレル 101.2 ドルとなっており、約 10 ドルの差がある。この差はかなり大きいと考えられる。

第2節 世界の石炭火力の使用割合

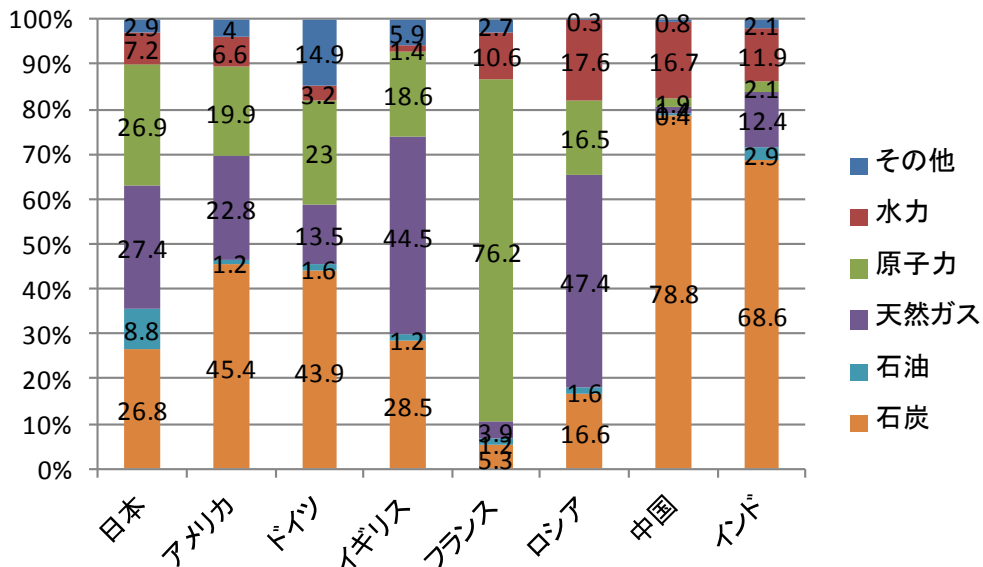
この節では、世界の石炭火力の使用割合について考える。

現在、世界の化石燃料の中で使用されている割合が最も多いのが石炭である。その石炭の世界中の使用割合は 41% である。図 3 は主要国の化石燃料の使用割合についてグラフに表したものである。図 3 を参照すると、中国では約 79%、インドでは約 69%、アメリカ

では 43%と石炭が最も多く使用されている。日本の使用割合は約 26%となっており、天然ガスより使用割合は少ないが、化石燃料の中では 2 番目となっている。世界の石炭の使用比率が約 41%もあることに対してドイツやロシアなどは使用割合が低いことから、中国やインドのような石炭の使用割合が多い国が使用割合の平均を上げているのではないかと疑問に考えたが、先進国であるアメリカやドイツが 41%を超えていることから、この割合は妥当だと考える。そこで図 3 より他の国の化石燃料の使用割合を参照して見ると、石炭の割合が極端に少ない国は他の燃料を主に使っているとわかります。例えばフランスは割合のほとんどが原子力となっており、火力発電はほとんど使用されていないが、使用割合の少ない化石燃料の中では石炭が最も使われている。他にロシアに焦点を当ててみると、ロシアは天然ガスの割合が最も多い。これは、ロシア独自の天然ガスを安く確保することができているからだと考えます。ロシアは中国にパイプラインを建設し始めることからロシアの天然ガスの所有量は多いと考えられる。など火力発電の使用割合が極端に少ない国は例外として考えるとほとんどの国は火力発電に依存しており、石炭火力を主に使用している。

石炭火力が主に使用されている理由としては、第 1 節で記している化石燃料の中で最も発電コストが安価であることと、埋蔵量が最も多いことであると考えられる。コストが安い事は発電する際コストが安ければ安いほど電気料金の価格は安くなる。埋蔵量が多いことは燃料の枯渇の心配を今のところする必要がない。このことから石炭は使用しやすい燃料として考えられている。

図 3. 主要国の化石燃料の使用割合 (2010 年)



IEA “Energy Balance 2011” より作成

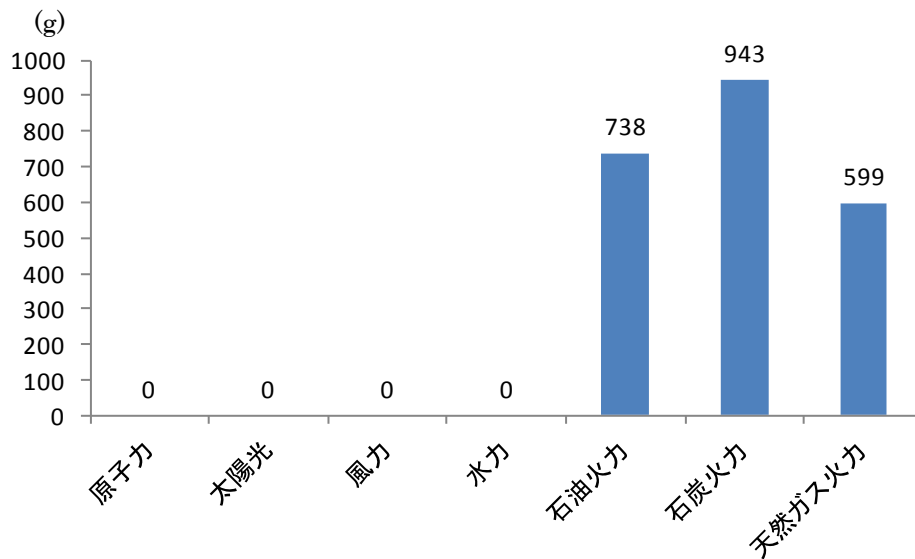
第3節 CO2 排出量が最も多い

この節では CO2 の排出量は最も多いことについて考える。

第 1 節で石炭火力のメリットを提示し、第 2 節でそのメリットから石炭火力は世界で使用されていることがわかった。しかし、唯一の石炭火力のデメリットとして、地球温暖化の原因の CO2 排出量が化石燃料の中で最も多いことが挙げられる。図 4 は 1kwh 当たりの CO2 排出量をグラフに表している。まず基本として、化石燃料以外は発電時 CO2 を排

出しないことから太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーと原子力発電はクリーンエネルギーとして考えられている。しかし、どの発電も発電所を造設や設置する際には必ず CO₂ が排出される。その中でも特に火力発電は CO₂ を多く排出することから、図 4 を参照し、3つの化石燃料を見比べてみる。2011年の1kwh当たりのCO₂排出量は石油で738g、石炭は943g、天然ガスは599gとなっており、石炭は天然ガスの1.5倍、石油の1.2倍のCO₂を排出している。このことから石炭のCO₂排出量が最も多いことが確認できる。CO₂を最も多く排出することで地球温暖化を深刻化させるのであれば、化石燃料の中でも少ない方の天然ガスを使用するだろう。日本は様々なCO₂排出量の削減の技術研究または実施している。新しい技術としてCO₂分離・回収システムがある。この開発中の技術が使用することができれば、今よりもCO₂排出量の削減ができ、地球温暖化対策に大きく貢献すると考える。

図 4. 1kwh 当たりの CO₂ 排出量 (2011 年)



・ CO₂ 排出量は電力中央研究所報告書、コストはエネルギー環境会議
コスト等検証委員会報告書（2011）を元に作成

第3章 先行研究

世界の原子力発電の動向と、日本の原子力政策の方向性

吉岡 斉（よしおか ひとし） 九州大学比較社会文化研究所教授

発電過程だけをみれば、原子力発電は火力発電に対してライフサイクルコスト（建設から廃止までの総コスト）において遜色がない、というのが関係者の共通認識である。しかし、インフラストラクチャーコストが高いだけでなく、システム全体としての最終的なコストも不確実である。とくに核燃料サイクルバックエンドコストについては、使用済核燃料の再処理路線を採用した場合には、金額およびその不確実性の幅が格段に大きくなる。なお、原子力産業の長期停滞状態が続いたために技術的・産業的基盤が劣化し、建設コストの高騰を招いているとの指摘もある。

原子力発電は、投資の対象として魅力がない。原子力発電は、他の発電手段よりも初期投資コストが格段に大きい。そのため、投資の回収に長期間を要するだけでなく、投資に見合う収入が得られなかった場合の損失が大きい。

原子力発電は、他の発電手段よりも初期投資コストが格段に大きい。そのため、投資の回収に長期間を要するだけでなく、投資に見合う収入が得られなかった場合の損失が大きい。他にも原子力発電は、事故・事件・災害等の勃発や、政治的・社会的な環境変化に対して極めて脆弱である

入門、エネルギーの経済学

藤井 秀昭（ふじい ひであき）

再生可能エネルギーには太陽光、風力、地熱、バイオマスがある。再生可能エネルギーの電源構成に占める割合は 1.6%程度であり、新エネルギー・地熱等の一次エネルギー国内供給に占める割合は 4.0%にすぎない。再生可能エネルギー利用の必要性は、1970 年代の石油危機後の石油代替エネルギー開発、1994 年発効の国際連合気候変動枠組条約に基づき地球温暖化防止の国際的取組の展開が開始された時期、の CO2 排出削減目的の低炭素化、2011 年発効 3 月 11 日の日本の東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所事故後の原子力依存の引き下げによる供給減少部分の代替である。

再生可能エネルギーの地域・地球規模での利用については、ライフサイクル・アセスメント（LCA）や生産・消費の両面からみた食糧需給や自然環境の影響分析も必要である。例えば、穀物から燃料を生産する場合、穀物耕作地を食糧用作物に分配するべきか、燃料用作物に配分するべきか、どちらを優先とするか資源配分の問題が生じる。エネルギー別にさまざまな問題点がある。このうち、優先順位の高い重要な課題は、経済性（相対価格）と安定供給（数量と品質）である。経済の問題は、再生化のエネルギー利用の発電費用は火力発電と比較して高い。

夏目（2012）では、太陽光発電には3つの問題があると考えられている。まず、価格に問題がある。電力会社が10年間、1kWh当たりの電力を42円で買い取ることが前提となっている。火力発電の発電コストは1kWh当たり10円、水力発電は8円、原子力発電は5円から11円となっている中、この価格は電力会社はかなりの高値で買うこととなっている。他に税金から補助金が支払われている。太陽光発電は補助金や電力料金の上乗せがなければ金額的に利用しにくい発電方法となっている。

次に問題としては、太陽光発電パネルの性能である。メガソーラーたけとよでは、1年間に6570万kWhの電力を供給する。火力発電所と比較してみる。まず武豊火力発電所2号機と比較してみると、この太陽光発電の1年間の電気をこの火力発電所はたった19時間半で発電することとなる。他に、碧南火力発電所との比較では、1時間47分で発電することとなっている。

次の問題は、太陽光発電などの自然エネルギーは不安定な発電である。主に天気が悪い場合太陽光の発電は低下する。もし、太陽光などの自然エネルギーのみで発電することとなると、ブラックアウトを起こす可能性が考えられる。これを踏まえて、自然エネルギーで100万kWhの発電を賄うこととなれば、その分火力発電で100万kWhの発電準備をしなければならないと考えられる。

第4章 現状分析

(1) CO₂ 排出量削減対策

石炭火力について環境面でどのような対策を研究または実施しているのか分析する。

まず、第2章の第3節で記載した石炭発電のCO₂排出量の問題に加え、石炭についても少し詳しく説明する。石炭を燃やした時に出る排出物にはCO₂以外にSOX（硫黄酸化物）とNOX（窒素酸化物）とばいじん（ススや燃えかす）がある。この3つとも環境面には悪影響を働く可能性がある物質であり、日本も排出している。しかし、世界規模で見るとこれらの排出物を排出する量は、日本が最も低い数字を出している。日本の石炭火力発電は今の状態でも最高水準の技術を持つ発電だとされている。つまり、世界中の石炭火力発電の中で日本は最もクリーンな発電をしている。しかし、日本がこれだけの高技術を持っているとしても、石炭火力から排出されるCO₂の排出量は化石燃料の中で最も多いとされている。

そこでCO₂排出量の削減をするために行われている対策や研究されている技術にはどのような物が存在するか調べる。まず、開発研究されている技術は、CO₂分離・回収・貯蓄システム（CCS）である。CCSの技術の基本的な考えは単純で、文字通り火力発電所から大気中に放出されていたCO₂を分離・回収し、回収したCO₂を貯蓄する技術である。分離・回収については3種類の技術がある。ボイラーで燃料を燃やす前に回収する燃焼前回収、燃焼後に回収する燃焼後回収、空気と燃料を混合するのではなく、酸素と燃料を混合し、排気ガス中のCO₂濃度を80%近くまで高めてから回収する酸素燃焼である。しかし貯蓄には困難な面がある。貯蓄は設計、建設、運用しなければならない。貯蓄方法としては、大気中へ染み出るリスクが小さい地中の帯水層への封入、地中の油田などに封入することで採掘効率を上げる方法や、河川や海洋への溶解、深海底で水ハイドレートとして沈着させる方法などがある。油田への封入が実用化されているほかは、多くがまだ研究段階にある。よって、分離・回収は実用化しているが、貯蓄はコストが大きいことで実用化が難しいとされている。この技術は東芝、三菱重工、親日鉄住金エンジニアリング等の複数メーカーが分離・回収プラントの大規模計画を進行している。

次に上げる技術はコンバインドサイクルである。最新の天然ガス火力では主流になっている発電方法で、東京電力や関西電力をはじめ大規模な火力発電所に相次いで導入されている。まず、火力発電には大きく分けて2種類の方法がある。空気を熱して発電用のタービンを回すか、水を熱して発生する蒸気でタービンを回すか、どちらかの方法を利用する。この2種類を組み合わせた発電方法がコンバインドサイクルである。最初に熱して発電した後に、その排熱を使って蒸気を発生させて2回目の発電を実行する。1回の燃焼によって2回の発電が可能になるため、同じ量の燃料からより多くの電力を作り出すことができる。ただし排熱は燃焼時の熱ほど高温ではなく、発電効率は2倍までにはならない。天然ガスを使った通常の火力発電では40%前後だが、最新のコンバインドサイクルの発電効率は60%近くまで上昇する。実際に関西電力が兵庫県の姫路第二発電所の設備を更新中で、天然ガスによるコンバインドサイクルを採用して60%の発電効率を実現している。ここで言う発電効率は熱エネルギーから電気エネルギーへ転換できる比率を表し、電力量の単位である1kwhを使用する。これまでコンバインドサイクルは天然ガスを燃料にした発電設

備にしか適用できなかつたが、最近では石炭を燃料にした発電設備にも応用できるようになってきた。石炭をガス化してから燃焼させる方法で、IGCC（石炭ガス化コンバインドサイクル）と呼ばれている。通常の石炭火力発電の効率はガス火力よりも低くなるが、IGCCでは50%以上に高めることが可能である。

代表としてCO₂分離・回収システムとコンバインドサイクルの2つを例に挙げた。このように各企業は様々なCO₂削減技術を研究している。その中でもこの2つの技術を例に上げた理由としてはJ-POWER（電源開発株式会社）がこの両方の技術を研究し実用化しようとしている。まず、J-POWERの技術分析として、J-POWERでは、最新鋭の発電技術や環境対策装置の導入などによる、世界最高水準のUSC（超々臨界圧）石炭火力発電所を設置している。これは、最新鋭の発電技術での発電効率の向上により石炭の消費低減が図ることができ、CO₂の排出量も抑制することができる。最新鋭の排煙脱硝、排煙脱硫、集じん装置の更新により窒素酸化物（NO_x）、硫黄酸化物（SO_x）、ばいじんの排出量を大幅に低減できる等の技術開発を行っている。既に同様の装置を磯子火力発電所は導入済みである。この技術は、欧米また日本国内の火力発電所と比べて極めて低い排出量を実現しており、主要先進国の火力発電所と比較すると、一桁低いレベルに抑制されている。磯子火力発電所は、「電力の安定供給の信頼度向上」「発電設備老朽化への対応」を目的として新1、2号機の建設を行い、「最新の環境対策設備の導入」「蒸気条件に超々臨界（USC）を採用」により、環境負荷低減とエネルギー効率向上を世界最高水準で両立したコンパクトな都市型石炭火力発電所として生まれ変わった。磯子火力発電所新1号機は、世界各国の火力発電熱効率の中で1番熱効率が良く、その効率は44%を超えることとなっている。加えて、この高効率をさらに超える高効率を目指し、新2号機の建設も計画されている。磯子火力発電所だけでなく、竹原火力発電所では、リプレース計画として、竹原火力発電所1号機（25万kW）、2号機（35万kW）、を新1号機（60万kW）に設備更新する計画を実施している。これは、1号機（25万kW）から新1号機（60万kW）へリプレースすることで約39%から約43%への発電効率の向上を計画している。この計画の推進理由としては、経年化が進んでいる発電所のリプレースをすることによって環境保全につながっていることである。

他にも、松島火力発電所では、大規模海外炭火力発電所を開発し、蒸気条件の向上やプラント規模の大型化等による発電効率の向上と低炭素化を推奨していたり、高砂火力発電所では、運転管理と設備更新により高い熱効率を維持した状態で運転を継続することが可能になり、運転開始から40年以上が過ぎた現在でも、運転開始当初とほとんど変わらない発電効率で運転を可能にしていたりすることから、この石炭火力発電所の技術は最高基準となっていることがわかる。しかし、これらの技術はあくまでも既存の微粉炭石炭火力発電の技術開発であり、これよりも高効率な石炭火力発電技術を持っている。

J-POWERで研究されている技術の中に、石炭の可燃性ガス化とCO₂分離・回収技術がある。まず、石炭の可燃性ガス化については、EAGLE（多目的石炭ガス製造技術開発）プロジェクトがある。このプロジェクトは石炭をガス化する、IGCC（石炭ガス化複合発電システム）、IGFC（石炭ガス化燃料電池複合発電システム）等の高効率複合発電を利用することにより、従来の微粉炭火力に比べて大きく発電効率を向上させ、単位発電量当りのCO₂排出量を低減することを狙った技術開発である。このプロジェクトによって発電効率は大幅に増加することになる。J-POWERでの現在の石炭火力の発電効率は平均、約43%ほどであり、日本での発電効率は平均、約41%である。これがIGCC等の最新技術を使用したEAGLEプロジェクトによって発電効率は約60%まで増加するとされている。この数字は、上記で記したコンバインドサイクルを利用した時の天然ガスの発電効率と同じである。ここでの発電効率は石炭を燃やしたことによって使用できるエネルギー発電率である。今までの発電効率では、石炭火力は天然ガス火力に勝つことはまだしも、同じ発電効率までたどり着くことはありませんでした。しかし、このIGCC等の新技術は天然ガスと

同じ発電効率まで高めることが可能となっている。次に CO₂ 分解・回収技術についてはまず、可燃性ガス中の CO をシフト反応で CO₂ と H₂ に転換したうえで CO₂ を分離・回収する。シフト反応とは CO に水蒸気を添加し、触媒反応で CO₂ と H₂ に転換する反応である。この分離・回収技術によって無駄に CO₂ を排出しないようにすることが可能となる。

2010 年からは「革新的 CO₂ 回収型石炭ガス化技術開発」として、IGCC+CO₂ 分離回収システムの高効率化を目指している。IGCC は究極の石炭利用発電技術であり、J-POWER が世界に先駆けて開発している。実現すれば現在の約 43%である発電効率を 60%程度まで、発電効率の向上を可能とする。それに加え、既存の微粉炭火力に比べ CO₂ 排出量を約 30%低減できる見込みである。CO₂ 排出量の 30%低減となれば、石油火力と同等の CO₂ 削減ができる。

この EAGLE プロジェクトは、10 年以上をかけてパイロット・プラント設備での試運転を実施し、2014 年 6 月にプロジェクトは終了した。この研究の成果を生かし今は、大崎クールジェンプロジェクトでの実証試験段階に入っている。このプロジェクトは中部電力と共同で行っている、IGCC として世界最高水準を目指してプロジェクトであり、現在のクリーンコール技術以上に CO₂ 排出量を抑制するための研究である。中部電力の大崎発電所構内に出力 16.6 万 kW の酸素吹 IGCC 実証実験発電所を建設し、3 段階の実証実験を計画している。実験の第 1 段階の開始に向けた建設工事をしており、現在は基礎工事の最盛期を迎えている。

この EAGLE また大崎プロジェクトでの IGCC 等の最新技術がなくとも世界の石炭火力発電より日本の石炭火力発電技術は優れている。そこに、このプロジェクトが実現することとなると、大きく日本に貢献することが可能となるだろう。

(2) 京都議定書の京都メカニズム

石炭火力は経済面ではどのようにするべきか考える。

まず、経済面で重要なのは「京都議定書」である。京都議定書は 1997 年 12 月国立京都国際会館で開かれた COP3 において締結された。この条約は、地球温暖化問題の解決に向けて各国が調査して行動していくことを定めた条約である。主に地球温暖化の原因である温室効果ガスの排出量を削減することを義務づけている。先進国全体では 2008 年から 2012 年までの第一約束期間において、1990 年比の 5%以上を削減することを目標としており、先進国の温室効果ガス排出量について、法的拘束力のある数値目標を各国ごとに設定している。日本は 1990 年比の 6%削減の義務を負うこととなった。三大経済圏を比較すると、EU は 8%削減、離脱したアメリカは 7%の削減となっており、日本の目標値は最も低い。しかし、日本は石油ショック以降省エネルギーが非常に進んでいたこと、公害問題の影響で事業者の環境意識が比較的に高かったことから、GDP 当たりの排出量は世界でも最低レベルである。それに加え、一人当たりの排出量でも先進国の中では比較的少ない方であったため、アメリカや EU に比較しても、そもそも削減余地が少なかったのである。平成 23 年度の日本の温室効果ガスの排出量は、13 億 800 万トン、基準年比では 3.7%増加しており、要因としては第 1 章で述べていた、東日本大震災の影響による火力発電の増加が挙げられる。この削減目標の数値は決して楽に実現できるものではないことから、例えばアメリカは早々に京都議定書から辞退している。この状態だと日本は目標値を不達成の可能性が出てくる。そこで、目標を達成する際に欠かせないのが「京都メカニズム」である。京都メカニズムとは、目標達成が困難な場合、他国と削減量（排出枠）を取引することにより、その国が「排出削減を行ったこと」にできる」仕組みである。京都メカニズムには、先進国間で認められている排出権取引である IET、ある先進国で実施された削減プロジェクトから発生した排出権を別の先進国が買い取る JI、途上国で実施された削減プロジェクトから発生した排出権を先進国が買い取る CDM がある。これらの排出権取

引から日本はどの排出権を使用するか考える。日本に合うと思われる排出権取引は CDM が有効であると考えられる。CDM の正式名称は、クリーン開発メカニズムと言い、京都議定書 12 条である。先進国と途上国が共同で事業を実施し、その削減分を投資国（先進国）が自国の目標達成に利用できる制度である。この制度は現在使用されており、例えば、東京電力はチリにバイオマス発電所の建設やメタンの回収をしている。中部電力は中国にフロンガス・HFC23 の回収・分離、N₂O の回収・分離をしている。関西電力は中国に水力発電所の建設、ブータンでも水力発電所を建設している等、電力会社は実際に京都メカニズムを導入している等、企業が率先して CDM を使用している。

排出権取引は与えられた削減量を取引参加者全体として最小費用で達成する。そこで、排出権の初期割当方法には無償配分方式と有償配分方式がある。無償配分方式には過去の排出実績に基づいて配分するグラントファザ・リング方式と、企業生産量に原単位を乗じた値に基づいて配分するベンチマーク方式がある。有償配分方式では、政府がオークションを通じて排出権を売却する。2009 年に修正された EUETS 指令においても、オークションで配分される排出権の割合を増やすことが推奨されている。この、無償で排出するか有償で排出するかという問題は非常に重要となってくる。

温室効果ガスを対象とした排出権取引市場を創設する動きは EU を超えて広がっており、日本の自主参加型国内排出量取引制度や北米での排出権市場が含まれている。他にも、これから創設を計画している国や地域も存在する。例えば、中国は北京を初めとするいくつかの都市や州において試験的に排出権取引を開始している。しかし、企業の参加型に強制力を持っているのは EUETS であり、他の排出権取引制度は自主参加型となっている。例えば、排出権取引には数種類の取引所が存在し、排出権を取引する市場によって取引価格は違ってくる。現在、シカゴ気候取引所 (Chicago Climate Exchange, CCX)、欧州気候取引所 (European Climate Exchange, ECX) のほか、Nord Pool や Pownernext などの市場があり、これらの市場価格に左右される。世界全体での排出取引の市場規模は、2007 年時点で約 400 億ユーロ（約 6 兆円）前後であるが、急激な拡大を見せており、今後も拡大は続く予想されている。取引総量は 2007 年時点で 27 億トンであり、急激に増加している。取引市場は各所点在しているが、一番主要な市場は EU 存在しているので、排出権取引の価格は EU の通貨ユーロが主流となっている。

排出権価格は様々な要因から影響を受ける。例えば、石炭価格が上がると排出権価格は下がると言われている。これは、石炭価格が上がると石炭の需要が減少するが、石炭エネルギー 1 単位当たりの CO₂ 排出量が大きいため、石炭需要の減少は排出権需要の減少をもたらす、結果として排出権価格が下がる。天然ガス価格が上がると排出権価格も上がると言われている。これは、天然ガスが上がると、天然ガス需要が抑えられる代わりに、相対的に割安となった石炭の需要が増え、結果として排出権需要も増える。また、電気料金が上がると排出権価格は上がることも示された。これは、電気料金の上昇は電力会社にとっては生産価格の上昇を意味し、電力会社に発電量を増加させるインセンティブを与えるからである。この排出権は価格変動が大きいことでも知られている。熱価格の変動と関係性が高いからである。価格変動の対策としては、排出権の繰り越し（バンキング）や将来の割当を前借りする（BORROWING）が存在する。

現在の排出権取引価格は 1 トン当たり 6.23 ユーロ（2014 年 10 月 30 日）である。現在 1 ユーロに対し日本円は 137.64 円となっており、排出権取引価格は 1 トン当たり 857.49 円となっている。排出権取引価格は 1000 円を超えると日本にとってかなり大きい利益になり始めると言われている。

排出権取引は難しい取引となっている。合理的な削減量を見つけることは、自国での削減と排出権購入の間の選択の問題になることから、限界削減費用と排出権価格との関係が重要となる。そこで、1 単位ごとに「自国で削減する」か「排出権を購入する」のどちらかを選択しなければならない。自国で排出したほうが削減費用は安いのか、排出権を購入

したほうが削減費用は安いかを見極めることが重要となってくる。それを踏まえ日本はどのように排出権を獲得するか、自国での CO2 削減をどのようにするかが重要である。これらのことから、日本での CO2 削減は難しく、排出権を獲得すべきであり、特に CDM について考えていくべきである。

第5章 政策提言

第 1 章では、火力発電を使用することによる問題点に CO₂ 排出量と発電コストの問題を確認した。第 2 章では、第 1 章の問題、特に石炭火力に焦点を当てて現状の分析をした。そして、第 4 章の現状分析より石炭火力について、日本が行うべきである対策や研究を分析した。この章では、第 4 章で分析した対策や研究について、日本が何をするか、どのようにしていくべきか提言を行う。

日本が解決しなければならない問題には、まず第 2 章で挙げた CO₂ 排出量の環境面の問題がある。CO₂ 排出対策としては、第 4 章で挙げた CO₂ 分離・回収システムと発電の高効率化がある。発電の高効率化について、本稿では火力発電の中の石炭火力について焦点を当てているので、IGCC がそれにあたる。次に、電気料金の高騰化、発電コスト等の経済面の問題がある。この問題には第 4 章の排出権取引が対策になると考える。以上 2 つの問題について考察する。私達の政策提言の題としては、石炭火力によるエコロジーとエコノミーである。

(1)、既存の石炭火力と最新の石炭火力との比較

まず、第 4 章の J-POWER の最新の石炭火力と、日本の既存の石炭火力発電所から、発電技術、CO₂ 排出量の削減にどれだけの差があるか比較する。

まず、竹原火力発電所では 1 号機 (25 万 kW) から新 1 号機 (60 万 kW) へのリプレースする計画がある。これにより、高効率化の向上が見込め、約 39% の発電効率から約 43% へ発電効率を約 4% 向上することとなっている。発電効率を上げることにより、CO₂ 排出量も抑制される。効率化による CO₂ 排出削減量は 4/39% であるので、約 10% の CO₂ 削減が可能になるということである。これは磯子火力発電所新 1 号機にも言えることで、この竹原火力発電所は J-POWER の当初の発電所であるが、他の世界の国の石炭火力発電より発電効率は高いとされている。磯子火力発電所は建設されているので、CO₂ 排出削減量は実際に約 1 割削減されている。そこで、日本の石炭火力発電所を磯子石炭火力発電所の発電効率を適用した場合について考える。

2011 年時の日本の年間電力消費量は全ての発電を含めて、9500 億 kWh である。この中の石炭火力の使用量は約 25% であるので、2375 億 kWh である。日本の石炭火力発電の平均発電効率は 41% である。日本の石炭火力の CO₂ 排出量は 1kWh 当たり、約 880g である。これらを使用し、日本の年間 CO₂ 排出量を計算する。

年間の石炭火力の電力消費量 × 1kWh 当たりの石炭火力の CO₂ 排出量より、

$$2375 \text{ 億 kWh} \times 880\text{g} = 209 \text{ 兆 g}$$

$$209 \text{ 兆 g} \text{ は } 2 \text{ 億 } 900 \text{ 万 t}$$

つまり、日本は約 2 億 900 万 t の CO₂ を年間で排出している。これを基準として、磯子火力発電所新 1 号機や竹原火力発電所新 1 号機のリプレース計画の CO₂ 排出削減量の約 10% を削減してみると、

$$2 \text{ 億 } 900 \text{ 万 t} \times 0.1 = 2090 \text{ 万}$$

つまり、日本の火力発電所を全て磯子火力発電所型に変えると、2090 万 t の削減が可能となる。

次に J-POWER の EAGLE プロジェクトまたは、大崎クールジェンプロジェクトを使用し、日本の全ての石炭火力発電所をこのプロジェクトの発電効率を適用した場合について考える。まず、このプロジェクトの最新の技術である IGCC を使用した石炭火力発電の CO₂ 排出量は 1kWh 当たり約 700g 排出するとなっている。次に、既存の IGCC でない石炭火力発電の CO₂ 排出量は約 880g 輩出している。IGCC と IGCC ではない石炭火力との CO₂ 排出量の差は約 1kWh 当たり、180g である。これを使用し試算する。

年間の石炭火力の電力消費量 × CO₂ 排出量の差 より、

$$2375 \text{ 億 kWh} \times 180\text{g} = 42 \text{ 兆 } 7500 \text{ 億 g}$$

42 兆 7500 億は、4275 万 t である。

このことから、このプロジェクトの発電技術を日本全体に適用させると 4375 万 t の CO₂ 排出量の削減が可能となる。IGCC を使用していない石炭火力の CO₂ 排出量は 2 億 900 万 t であることから、IGCC を使用すると、IGCC を使用していない石炭火力発電の CO₂ 排出量の約 20% を削減することができる。

日本に課された京都議定書での削減義務である CO₂ 排出量 6% の削減に対し、これらの発電効率化による CO₂ 排出量の削減を使用することによりどれほどの CO₂ 排出量が削減できるか考察する。京都議定書の基準年である 1990 年の日本の CO₂ 排出量は 12 億 6100 万 t である。この数字から、磯子火力発電と IGCC に日本の石炭火力発電所を置き換えた場合の CO₂ 削減量との割合を試算する。

磯子火力発電所の場合

磯子火力発電所に置き換えた場合の CO₂ 排出削減量 ÷ 1990 年の CO₂ 排出量

$$2090 \text{ 万 t} \div 12 \text{ 億 } 6100 \text{ 万 t} = 0.016$$

この試算より 1.6% の削減が可能となっている。

IGCC の火力発電の場合

IGCC に置き換えた場合の CO₂ 排出削減量 ÷ 1990 年 CO₂ 排出量

$$4275 \text{ 万 t} \div 12 \text{ 億 } 6100 \text{ 万 t} = 0.3$$

この試算より 3% の削減が可能となっている。

このことから、磯子火力発電所では 1.6% であり、1990 年比の約 20% の削減割合となり、IGCC の場合は 3% であることから、1990 年比の 50% の削減割合となる。これは、京都議定書に課された 6% の削減義務に大きく貢献することができることとなっている。

それに加え、J-POWER の最新の発電効率である技術を使用すると、現在の世界の CO₂ 排出量の約 5 割を占める中国、インド、アメリカの全石炭火力発電所に世界最高水準の J-POWER 磯子火力発電所の発電効率を適用した場合、日本の年間総排出量以上の約 14.7 億 t-CO₂ の CO₂ 削減効果があると試算されている。

(2)排出権の獲得

第4章より、現在の排出権取引価格は6.24ユーロであり、日本円は137.64円であったことから日本円にして857円となる。これを使用し、中国、インド、アメリカの全石炭火力発電所に磯子火力発電所を適用すると、約14.7億t-CO₂のCO₂排出量削減から排出権取引について考察する。

$$14.7 \text{ 億 t} \times \text{排出権取引価格}$$

$$=14.7 \text{ 億 t} \times 857 \text{ 円} = 1 \text{ 兆 } 2597 \text{ 億 } 9000 \text{ 万円}$$

つまり、1兆2597億9000万円の排出権取引価格となる。

磯子火力発電所の発電効率の適用でこれほどの利益を得ることができれば、IGCCで試算を検討する。磯子火力発電所のCO₂排出量の削減量は約10%であり、IGCCのCO₂排出の削減量は約20%となっており、IGCCは磯子火力発電所のCO₂排出削減量が2倍となっている。つまり、上記の排出権取引価格の2倍ということなので、2兆5195億8000万円の取引価格となっている。

京都議定書で日本が負うこととなった6%を1990年比から割り出すと、

$$12 \text{ 億 } 6100 \text{ 万 t} \times 0.6 = 7566 \text{ 万 t}$$

6%の削減の債務は7566万tである。

磯子火力発電所型に日本の石炭火力を置き換えた場合の削減割合は1.5%となることから、1.5%を6%の削減比から割り出すと、ちょうど半分になるので、

$$7566 \times 1.5 = 1891.5 \text{ 万 t}$$

残りは、1891.5万tとなる。

残り1891.5万tということは、J-POWERの技術を世界に輸出した場合、日本が獲得しなければならない排出権は、

$$1891.5 \text{ 万 t} \div 14.7 \text{ 億 t} = 0.05$$

つまり、世界の主要国の石炭火力発電所を磯子火力発電所に変えた場合の全体の5%のシェアを獲得すればよい。

(3)まとめ

このことより日本はIGCCなどの最先端である発電高効率技術を使用することでかなりのCO₂排出量を削減できる見込みである。日本の多くの石炭火力発電所を最先端のIGCCの技術にリプレースすること、世界の石炭火力発電所をIGCCに置き換えることで京都議定書の削減目標である6%は達成することができる。このことは、(1),(2)でおこなった試算により確実である。研究段階であるIGCCでなくとも、完成している磯子火力発電所の技術を使用することでも日本に大きく貢献することができる。IGCCまたは磯子火力発電所の最新技術を日本の石炭火力発電所にリプレースすることに加えて、世界にこの石炭火力の技術を輸出することを政策提言とする。

この提言にかかる費用は、現在日本がCO₂対策に使用している省エネルギーや再生可能エネルギーの費用をこの石炭火力に回すことで十分に賄えることができる。これによ

り、一般市民にとって省エネルギーや再生可能エネルギーに対する不安を取り除くこともできると考えている。

先行研究・参考文献・データ出典

- ・スマートジャパン キーワード解説「火力発電の弱点を補う二酸化炭素回収」
<<http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1306/14/news096.html>>
- ・三菱重工 CO2 回収装置
<<http://www.mhi.co.jp/discover/earth/learn/ccs.html>>
- ・「日本の財政（平成 25 年度版）」 市川健太編著者 東洋経済新報社
- ・排出取引 - Wikipedia
<<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%8E%92%E5%87%BA%E5%8F%96%E5%BC%95>>
- ・「エネルギー経済学」馬奈木俊介編著者 (株)中央経済社発行
- ・日本の電力消費 - 電力事情について | 電気事業連合会
<http://www.fepc.or.jp/enterprise/jigyoku/japan/>
- ・ J-POWER の公式 HP
<http://www.jpowers.co.jp/>
- ・大停電を回避せよ！ 著者、夏目幸明
- ・世界の原子力発電の動向と、日本の原子力政策の方向性
吉岡 斉（よしおか ひとし）九州大学比較社会文化研究所教授
- ・入門、エネルギーの経済学 藤井 秀昭（ふじい ひであき）