

# クリーン・コール・テクノロジー普及が アジアのCO<sub>2</sub>排出削減対策およびエネルギー需給に及ぼす影響の評価

新領域創成科学研究科 環境システム学専攻 (2010年3月修了予定)

氏名：小山 勇太 学生証番号：47-076760

指導教員：島田 荘平 (准教授)

Keywords: Clean Coal Technologies, DNE21 Model, Energy, CO<sub>2</sub> Emissions, Asia

## 1. 研究の背景

新興国でのエネルギー需要増加にともない、世界各国による資源獲得争いが熾烈さを増してきている。近年は金融危機による資源価格高騰の影響もあり、世界各国がエネルギーセキュリティの重要性について改めて実感することとなった。

こうした背景から、世界中に広く分布し埋蔵量が豊富であり、価格が安定かつ安価である石炭の活用が注目を集めている。しかし、石炭は地球温暖化の原因となるCO<sub>2</sub>の排出量が他の化石燃料と比較して多いことや、SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>などの大気汚染物質を多く含みその使用が酸性雨の原因となるなどのデメリットがある。これらの問題を解決するため、エネルギー転換効率の向上や、脱硫・脱硝によって石炭を有効活用する技術「クリーン・コール・テクノロジー(以下CCT)」の研究・開発が世界中で進められている。

特に石炭が一次エネルギー供給に占める割合が他の地域と比較して高く(Fig 1.1参照)、今後の経済成長によってエネルギー需要が大幅に増加することが予想されるアジアにおいてCCT普及は将来のエネルギー供給、環境問題対策にとって重要である。従来のアジア諸国は、通貨価値、予算等の問題で最新のCCTを導入できないなどの問題があった。しかし、気候変動枠組み条約会議(COP3)で採択された京都議定書に示されている排出権取引(ET)、共同実施(JI)、クリーン開発メカニズム(CDM)といった京都メカニズムを利用することで、CO<sub>2</sub>排出削減対策としてアジアにCCTが普及し、将来に向けた石炭資源活用の道が開かれると期待されていた。しかし、アジアでは最新のCCT普及はさほど進んでいないのが現状である。

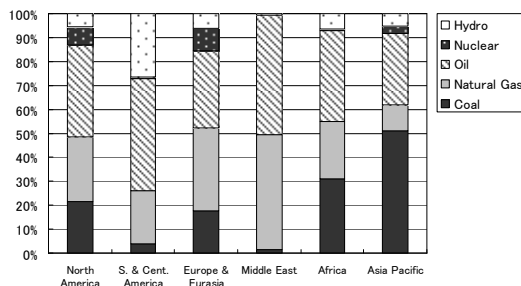


Fig 1.1 Regional Primary Energy Consumption Pattern 2008  
(Source: BP Statistical Review of World Energy 2009)

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、CCT普及がアジアのCO<sub>2</sub>排出削減対策およびエネルギー需給に及ぼす影響を評価し、アジア各国が表明しているCO<sub>2</sub>排出削減目標を達成するためにCCTが果たす役割やアジアにおける最適なエネルギーシステム構築について検討することである。

対象地域をアジアとした理由は2点ある。

ひとつは、経済成長にともなうエネルギー需要の大幅な拡大が見込まれているため、そしてもうひとつは、石炭が一次エネルギー供給に占める割合が高く石炭消費量も多いという傾向が今後も続く可能性が高いとされており、将来的なCCT導入のメリットが大きいと予想されるためである。

BP Statistical Review of World Energy 2009によると、2008年に全世界で消費された石炭の総量は3303.7[MTOE]であり、その内の約61%にも及ぶ2030.2[MTOE]の石炭がアジア・パシフィック内で消費されている。さらに各研究機関の発表によると、将来的にもアジア・パシフィック内ではさらなる石炭消費拡大が予想されている。U. S. Energy Administrationが発表しているInternational Energy Outlook 2006によると、石炭消費におけるアジアのプレゼンスは今後さらに高まるとされており、2030年には石炭消費増加量の80%近くをアジアが占め、石炭消費増加量の約60%を中国、次いで約30%をインドが占めるまでに著しい石炭消費増加が予想されている。

## 3. シミュレーションモデル

本研究では、アジアでのCCT普及がアジアのCO<sub>2</sub>排出削減対策およびエネルギー需給に及ぼす影響をグローバルかつ長期的に評価するために、DNE21(Dynamic New Earth 21)という統合評価エネルギーモデルを用い、これに改良を加えたモデルでシミュレーションをおこなった。以下ではDNE21モデルの概要と改良点について記す。

### 3.1 DNE21モデル概要

DNE21は、グローバルかつ長期的な視点から、どのような温暖化対策を取るのが世界全体にとってコスト効率的なのか、その際各地域はどのような対策分担を行うのがそれぞれの地域にとってコスト効率的なのかを見出すことを目的とし、東京大学藤井らによって開発されたモデルである。

DNE21の構造は、エネルギー生産、変換、消費およびCO<sub>2</sub>回収、貯留・隔離等のプロセスを詳細に記述した「エネルギーシステムモデル」を中心に、マクロ経済全体を把握する「マクロ経済モデル」、CO<sub>2</sub>濃度や気温上昇等を算出可能な「気候変動モデル」を一体化した非線形最適化型のモデルとなっている (Fig 3.1 参照)。

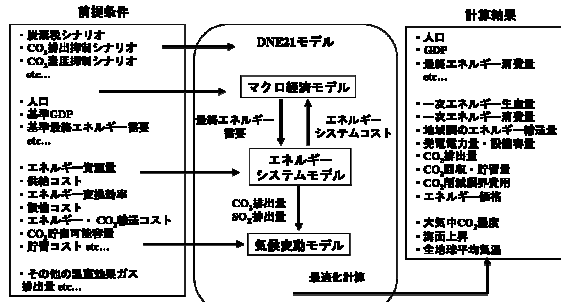


Fig 3.1 DNE21 モデルの構成概略と主な入出力

### 3.2 目的関数

DNE21モデルでは、以下に記した目的関数を用いて、消費効用の最大化と総エネルギーシステムコスト最小化の最適化計算をおこなっている。なお、消費効用の最大化とは、エネルギーシステムコストも含んだ、より広範な経済システムの最適化を意味する。またDNE21には様々な要素がモデル化され、シミュレーションに組み込まれている。例えば一次エネルギーは天然ガス、石油、石炭、バイオマス、水力・地熱、太陽光、風力、原子力の8種類に、最終需要は、気体燃料、液体燃料、固体燃料、電力の4部門にモデル化している。さらにエネルギーの大陸間移動、現行技術の技術改良、新エネルギー導入などもモデルに組み込まれており、これらを整合的に表現するために、約1万個の変数と約1万本の方程式を含む大規模なモデルとなっている。

$$\begin{aligned}
 OF = & \sum_t \sum_g \sum_i \sum_j (Disc(t) \times ProdCost(r, g, i) \times PR(r, g, i, t)) \\
 & + \sum_t \sum_i \sum_j (Disc(t) \times OpeCost(u, i, j) \times US(u, i, t)) + \sum_t \sum_j \sum_i (Disc(t) \times DisCost(f, i, t) \times DC(f, i, t)) \\
 & + \sum_t \sum_i \sum_j \sum_k (Disc(t) \times TraCost(tr, i, j, k) \times TR(tr, i, j, k, t)) + \sum_t \sum_i \sum_j (ConstCost(e, i, t) \times EC(e, i, t)) \\
 & + \sum_t \sum_i \sum_j \sum_k (TConCost(te, i, j, k) \times TC(te, i, j, k, t)) + \sum_t \sum_i \sum_j (Disc(t) \times StoCost(st, i, t) \times ST(st, i, t))
 \end{aligned}$$

r: 資源名 g: グレード i, j: ノード名 t: 時点 u: 変換方法  
tr: 輸送方法 e: 変換設備名 te: 輸送設備名 st: 貯蔵名 f: 燃料名  
Disc(t): 割引率 ProdCost(r, g, i): 生産コスト  
OpeCost(u, i, j): オペレーションコスト DisCost(f, i, t): 配送コスト(送配コスト)  
TraCost(tr, i, j, k): 輸送コスト ConstCost(e, i, t): 変換設備コスト  
TConCost(te, i, j, k): 輸送設備コスト StoCost(st, i, t): 貯蔵コスト  
OF: 目的関数 PR(r, g, i, t): 生産量  
US(u, i, t): 変換投入効率 DC(f, i, t): 需要消費量  
TR(tr, i, j, k): 輸送量 EC(e, i, t): 変換設備建設費  
TC(e, i, t): 輸送設備建設費 ST(st, i, t): 貯蔵量

### 3.3 モデルの改良点

本研究で用いたモデルの主な改良点は以下の2点である。

(1) DNE21は世界全体を10地域、アジアに関しては日本、計画経済圏のアジア、その他アジアの3地域に分割していた。

本研究で用いたモデルでは、アジア地域をさらに

詳細に地域分割し日本、中国、インド、韓国、インドネシア、ベトナム、その他の発展途上アジアの7地域に分類した (Fig 3.2参照)。

(2) 今後普及が見込まれているCCT (USC:超々臨界圧発電、IGCC:石炭ガス化複合発電)の普及をモデルに組み込んだ。

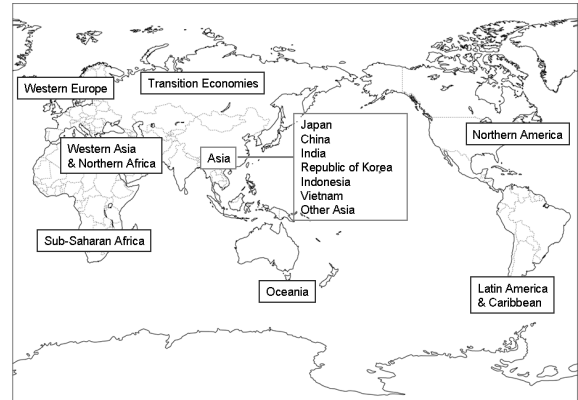


Fig 3.2 モデルにおける世界地域区分

## 5. 結果と考察

### 5.1 シミュレーションシナリオ

本研究では、CO<sub>2</sub>削減規制がなく、モデルによるコスト最適化計算のみをおこなったリファレンスケース (Ref)、排出権取引とCO<sub>2</sub>削減規制を設定したCO<sub>2</sub>排出削減戦略実施ケース (ERS)、CCT導入なしでERSと同じ条件を設定したケース (NO CCT) など、複数のシナリオを設定して2010年から2050年までの各時点におけるエネルギー供給、CO<sub>2</sub>排出量などについてシミュレーションをおこなった。

制約条件として、原子力発電の使用は現在使用されている国のみとし、全世界の設備容量の上限を2030年においては830 [GW]、2050年においては1030 [GW]とした。水力・地熱発電は世界エネルギー会議のSurvey of Energy Resources 1998のデータをもとに14000 [TWh/yr]、風力発電は米国気候データセンターの風速データと千葉大学の土地利用メッシュデータを用いて12000 [TWh/yr]、太陽光発電はNASAのSeaWiFSの日射強度衛星データとメッシュ別の月平均日射強度と千葉大学の土地利用メッシュデータを用いて1270000 [TWh/yr]とし、全世界での賦存量とした。

CO<sub>2</sub>排出規制は、2009年12月COP15開催時点において世界各国が表明している削減目標をもとに以下のように設定した。

- 日本  
2020年までに1990年比でCO<sub>2</sub>排出量を25%削減、2050年までに同年比で50%削減。
- 中国  
2020年までにGDPあたりのCO<sub>2</sub>排出量を2005年比で40~45%削減、2050年までに1990年と同レベルまで削減。

- ・インド  
2020年までにGDPあたりのCO<sub>2</sub>排出量を2005年比で20~25%削減、2050年までに1990年と同レベルまで削減。
- ・韓国  
2020年までにCO<sub>2</sub>排出量を2005年比で4%削減、2050年までに1990年と同レベルまで削減。
- ・インド、中国を除く発展途上国のアジア  
2020年までCO<sub>2</sub>排出規制なし、2050年までにCO<sub>2</sub>排出量を1990年と同レベルまで削減。

その他の地域に関しては、主要先進国では各国が表明した2020年までのCO<sub>2</sub>排出削減目標達成、2050年までに1990年比でCO<sub>2</sub>排出量50%削減、発展途上国では2020年までCO<sub>2</sub>排出規制なし、2050年までにCO<sub>2</sub>排出量を1990年と同レベルまで削減という規制条件を与えて計算をおこなった。

## 5.2 シミュレーション結果と考察

本稿では、紙面の関係上アジア全体の結果についてのみを記す。なおアジア各国ごとの結果は発表の際におこなう。

Fig 5.1 はERS ケースでのアジアにおけるCO<sub>2</sub>排出量と各種対策によるCO<sub>2</sub>削減量を示している。

アジアにおけるコスト最適なCO<sub>2</sub>削減対策として、2010年から2020にかけては省エネルギー(Conservation)、単位発電量あたりのCO<sub>2</sub>排出量が多い石炭からより小さな石油、さらに小さな天然ガスへの化石燃料内転換(Conversion)が実施された。2020年以降、発展途上国を含めた大幅な排出削減をおこなう場合には、化石燃料から非化石燃料への燃料転換(Fuel Switch)、CO<sub>2</sub>地中貯留(CCS Land)の果たす役割が重要となった。

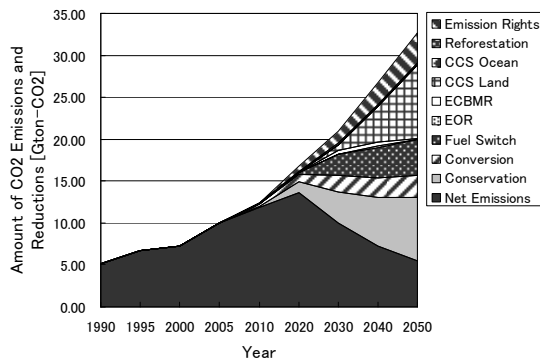


Fig 5.1 Amount of CO<sub>2</sub> Emission and Reduction in Asia

Fig 5.2 は各シナリオでのアジアにおける石炭消費量の推移を示している。Ref ケースでは、各機関で予測されているように、今後もアジアにおける石炭消費は増加し続ける結果となった。ERS ケースにおいては2010年から2030年までアジア

における石炭消費量は落ち込むが、2030年以降は再び増加する結果となった。この原因はアジアにおけるコスト最適なCO<sub>2</sub>排出削減対策として、2010年から2030年までは化石燃料内転換や非化石燃料への燃料転換が実施されるため、化石燃料の中で最も単位熱量あたりのCO<sub>2</sub>排出量が多い石炭の消費が抑制されるが、その後のCCS実用化とともに石炭の利用が再び促進することを示唆していると考えられる。NO CCT ケースでは石炭の消費量が2020年をピークに2050年まで減少し続ける結果となった。

これらの結果から、CO<sub>2</sub>排出規制下のアジアにおいて石炭利用を今後も進める場合、CCT普及は必須であること、また長期的な石炭利用のためにはCCSの実用化が非常に重要だといえる。

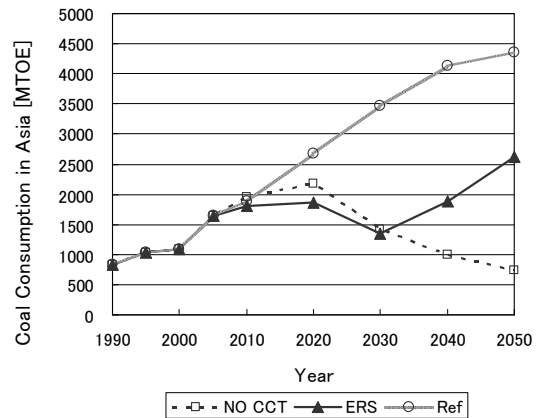


Fig 5.2 Coal Consumption in Asia

Fig 5.3 はERS ケースでのアジアにおける一次エネルギー供給バランスを示している。2010年以降、再生可能エネルギーやその他(バイオマスなど)の割合が大きく増加し、2030年以降の合計は、アジアの一次エネルギー供給の25%程度を占める結果となった。化石燃料(天然ガス、石油、石炭)については、2020年から2030年にかけて供給量が減少しているものの、依然として化石燃料が一次エネルギー供給の大部分(66.0%~86.9%)を占める結果となり、供給形態に大きな変化は見られなかった。

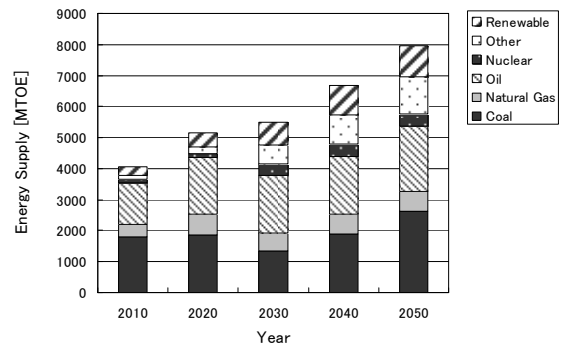


Fig 5.3 Primary Energy Supply Balance in Asia

Fig5. 4はERSケースでのアジアにおける電力供給バランスを示している。2010年以降、再生可能エネルギー、その他(バイオマスなど)による発電量が増加し、2050年には全発電電力量の32.3%を占める結果となった。化石燃料由来の総発電量は2020年から2030年までに減少するがその後は増加した。特に石炭火力の発電量が大きく増加し、2030年には4914.8[TWh]であった総発電量が2050年には13980.3[TWh]となった。この結果をCO<sub>2</sub>排出削減対策の結果とあわせて考察すると、CCSが実施されることで、石炭火力発電は将来的なアジアの電力供給においても重要な役割を果たすと考えられる。

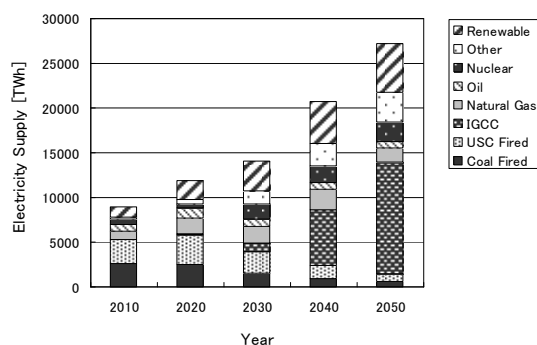


Fig 5.4 Electricity Supply Balance in Asia

Fig 5.5は各シナリオでのCO<sub>2</sub>シャドープライスを示している。CO<sub>2</sub>シャドープライスとは、当該時点においてさらにCO<sub>2</sub>排出を1単位減少させるときに必要なCO<sub>2</sub>排出削減限界費用である。

2050年においてCO<sub>2</sub>シャドープライスを比較すると、ERSケースでは97.3[\$/t-CO<sub>2</sub>]であるのに対し、NO CCTケースでは105.0[\$/t-CO<sub>2</sub>]となった。

この結果から、CCT普及はCO<sub>2</sub>排出削減対策として経済的にも効果があるといえる。

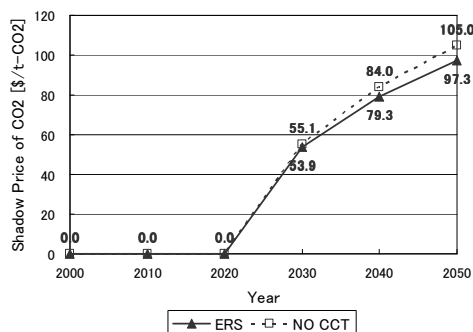


Fig 5.5 Shadow Price of CO<sub>2</sub>

## 6. 結論

本研究では、CCT普及がアジアのCO<sub>2</sub>排出削減対策およびエネルギー需給に及ぼす影響を評価し、世界各国が表明しているCO<sub>2</sub>排出削減目標を達成するためにCCTが果たす役割やアジアにおける最適なエネルギーシステム構築について考察した。

シミュレーションモデルには東京大学 藤井らによって開発された統合評価エネルギーモデルDNE21をもとに、アジア地域の詳細分割、各種CCTの普及を組み込むなどして改良を加えたモデルを用いた。

本研究の結果からは以下の知見が得られた。

1) CO<sub>2</sub>排出削減規制下のアジアで、コスト最適なエネルギー供給をおこなう場合、再生可能エネルギー、その他(バイオマスなど)のエネルギー利用が促進し、2030年以降には一次エネルギー供給量の25%程度を占める結果となった。一方、化石燃料の占める割合は減少傾向にあったが、2010年から2050年までの各時点においてもアジアの一次エネルギー供給量の60%以上を占める結果となった。この結果から、将来的にもアジアの一次エネルギー供給は化石燃料への依存度が高く、供給形態に大きな変化はないと予想される。

2) アジアにおける将来的な石炭の利用は、CO<sub>2</sub>排出削減対策の影響で2030年まで抑制傾向にあったが2030年以降に見られたCCSの実用化に伴い消費が拡大した。また2010年から2050年までの各時点においてもアジアの全発電電力量の40%以上が石炭火力によって供給されたという結果から、アジアの電力供給における石炭の役割は将来的にも重要だと予想される。

3) CCTの普及はCO<sub>2</sub>排出削減に寄与するだけでなく、将来の石炭利用にとって非常に重要なことが確かめられた。

今後の展望としては、石炭の種類ごとに有効なCCTは何かを評価するため、石炭を価格だけでなく炭種によっても分類すること、さらに将来的な地域間の石炭輸出入フローを予測できるように、石炭の地域間の輸出入を明示的に考慮し、石炭需給バランスを計算するようにモデルを改良することなどがあげられる。

## 参考文献

- 1) Y. Fujii, K. Yamaji; Assessment of technological option in the global energy system for limiting the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, Environmental Economics and Policy Studies, 1998
- 2) 新エネルギー・産業技術開発気候/(財)地球環境産業技術機構; 平成5年~13年度 地球再生計画の実施計画に関する調査報告書, 1994~2002
- 3) BP; Statistical Review of World Energy, 2009
- 4) International Energy Agency; World Energy Outlook 2007 China and India Insights, 2007
- 5) U. S. Energy Administration; International Energy Outlook, 2006