

10. 持続可能なエネルギーシステム ー2014年バージョンー

水谷 潤太郎

土木学会フェロー（〒222-0024 横浜市港北区篠原台町36番20号）

E-mail: QZF02502@nifty.ne.jp

IPCCは温暖化ガスの排出削減に関する報告書を公表し、ドラスティックな対応を求めている。一方、日本のエネルギー基本計画では、再生可能エネルギーや原子力を位置付けてはいるものの、どうやってIPCCの要求に応えるのか不明である。特に、石炭排ガス中の炭酸ガスをどう処分するのか、CCS（隔離・貯蔵）や原子力を拡大していくのか、決断が迫られよう。

しかし昨2013年の地球環境シンポジウムで提示したエネルギーインフラ図は、今後とも不変である。

今年は、水素エネルギー社会・石炭利用・原子力などについて、特に検討した。

水素は今後の基幹的エネルギー媒体になると期待され、その安価な輸送技術の開発が求められる。シクロヘキサン系や液化水素システムなどが候補である。

石炭は廉価かつ安定したエネルギー源であるので、今後ともベース電源として活用することはやむをえない。トリプルコンバインドサイクル発電など高効率化を図るべきである。しかし中長期的には、原子力や水素で代替すべきである。

原子力については、当面は既存施設の再稼働に邁進するとともに、高温ガス炉などの本質的に安全なシステムや統合型高速炉の開発を進める。後者によれば原子力（核分裂）はほぼ持続可能なエネルギー源になると考えられ、核融合と並んで推進すべきである。

自然エネルギーは、延性帯EGS地熱発電や（国外における）大規模水力発電（＋水素化）などの、比較的低廉なエネルギー源を推進すべきである。

Key Words: sustainability, hydrogen energy society, nuclear energy, integral fast nuclear reactor, coal

1. はじめに

昨2013年の地球環境シンポジウム以降、エネルギーシステムの分野でも多くの出来事があった。

国連の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、2014年4月13日に温暖化ガスの排出削減に関する報告書を公表し、地球の気温上昇を産業革命前から2度C未満に抑える国際合意を守るには、温暖化ガスの排出を2050年に2010年比40～70%減らす必要があると分析した。電力供給に占める再生可能エネルギーや原子力といった低炭素エネルギーの比率を、現在の30%から80%以上に引き上げる対策を取るよう促した¹⁾。

原子力は温暖化ガスの排出が少ないベースロード電源だが、さまざまな障害やリスクがあるとしている。

また、日本のエネルギー政策の指針となる新たな「エネルギー基本計画」が2014年4月11日に閣議決定された²⁾。

これによれば、再生可能エネルギーについては、安定供給面やコスト面で課題を抱えるものの、温暖化ガスを

排出せず国内で賄えることから、「有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源」と位置付けている。原子力は「重要なベースロード電源」と位置付けられ、政府は再稼働を容認しつつ、「依存度は可能な限り低減させる」とした。

石炭も「重要なベースロード電源」と位置付けられ、最新技術導入による高効率化促進などが政策として掲げられた。天然ガスは、化石燃料としては比較的温暖化ガスの排出が少ないことから、「役割を拡大していく重要なエネルギー源」とされた。

石油については、電源だけでなく、自動車などの燃料や化学製品の原料など多様な用途を持つことにふれ、重要性が明記された。持ち運び可能なことや、全国供給網の整備により緊急対応に優れることから、「今後とも活用していく重要なエネルギー源」とされた。液化石油ガス（LPG）もその貯蔵性や可搬性から「緊急時に貢献できる分散型のエネルギー源」とされている。東日本大震災直後のエネルギー不足の経験から、石油とLPGはいず

れも「災害時のエネルギー供給の最後のとりで」と分析されている。

このIPCCの報告と日本のエネルギー基本計画がどのように対応しているのか不明である。たとえば、エネルギー基本計画では石炭を重要なベースロード電源として位置付けているが、これは温暖化ガスの排出量を増やすものであり、IPCCの報告とどのように整合性をとっていくのか、今後の課題であろう。炭酸ガスのCCS（隔離・貯蔵）を世界的合意の下で行うのか、将来的にはやはり原子力で石炭を置き換えていくのか、などの検討が求められよう。

いずれにしても、昨2013年の地球環境シンポジウムで提示したエネルギーインフラシステム図の構造は不変であり、これに沿って今後構築すべきエネルギーシステムを考察していくべきと考える。

2. 今後構築すべきエネルギーシステム

昨2013年の地球環境シンポジウム提出論文³⁾や第6回アジア土木技術国際会議に提出した論文⁴⁾で提示した、今後構築すべきエネルギーインフラシステムの構造（図-1）は今後とも変わらず、これからも考察の基礎となるものである。さらに、昨2013年以後に特に進展があった側面は以下の項目であり、これらに沿って下記の通り考察を進める。

- (a)水素エネルギー社会、
- (b)石炭火力発電の実施、トリプル複合発電の推進、
- (c)今後の原子力、 (d)その他。

(1) 水素エネルギー社会

資源と環境の両面から持続可能なエネルギーシステムという視点から見た、水素に期待されるメリットは以下の諸点であると指摘されている⁹⁾。

- (a)燃料として利用時点でクリーン（生成物が水）であること、
- (b)多様なエネルギー資源から製造できるため特定資源の供給制約を避けられること、
- (c)小規模でも高効率で電気に変換されること、
- (d)原子力や各種再生可能エネルギーからも生産できるため製造時にも炭酸ガス排出を避けられること、
- (e)炭酸ガス回収貯留（CCS：CO₂ Capture and Storage）と組み合わせれば、大量に賦存する石炭資源からも炭酸ガス排出を伴わずに水素を製造できること、
- (f)製鉄・石油精製・ソーダ工業など種々の産業プロセスで副生される水素を有効利用できること、
- (g)長距離大量輸送が可能であるため僻地の自然エネルギー資源を水素に変換して利用できること、
- (h)廃アルミニウムなど含エネルギー廃棄物を利用して製造できるため循環型社会に寄与できること、
- (i)廃熱を利用して必ずしもクリーンでない他の化学物質から製造できること、
- (j)水素の電気化学特性を利用した蓄電池やヒートポンプなどを通して、エネルギーシステムの効率化に寄与できること。

国内末端利用の水素コストが運輸用で約40円/Nm³、運輸以外用で約30円/Nm³になれば、2050年には運輸以外の大規模発電・石油精製・ガスエンジン等でも水素が大量に使用される、としている。

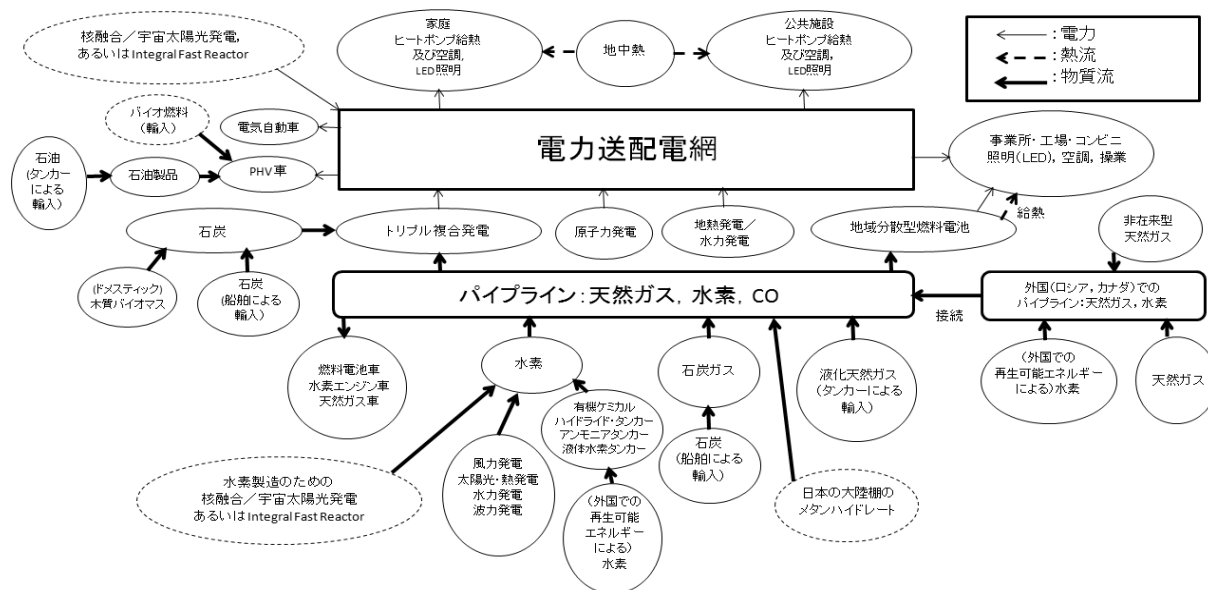


図-1 今後構築すべきエネルギーインフラシステム（2013年7月、2014年6月に再掲）

国内では水素の輸送にパイプラインを利用すれば、パイプライン自体が巨大な電池ともみなしうるので、不安定な風力や太陽光などの再生可能エネルギーを使う場合でも、安定して電力エネルギー供給が可能になると指摘している⁶⁾。

水素の大量輸送については、エネルギー密度が比較的高く、長期的な安定性に優れており、石油タンカーや燃料貯槽などの既存インフラを活用できることから、トルエン+水素⇄シクロヘキサンの系を利用することが提唱されている⁷⁾。また液化水素輸送船を利用することも提唱されている⁸⁾。前者は中東の天然ガス・伴生ガスから生成される水素や国内の製鉄所や石油精製所から発生する水素を利用するとしており、後者はオーストラリアの褐炭利用水素やロシアでの水力発電による水素を運ぶことが構想されている。

(2) 石炭火力発電の実施、トリプル複合発電の推進

橋本は、石炭焚き火力発電の効率向上の意義について次のように述べている⁹⁾。「地球温暖化の最大の課題は、中国とインドの二酸化炭素排出量の低減である。その為には経済性が鍵となり、経済性の高いシステムは世界的には原子力発電と高効率石炭火力発電である。だから原子力発電の早期再開が必須だが、石炭焚き火力発電にも大きな期待がかかっている。」

中国とインドでは効率30%の石炭焚き発電所が主流だが、これを効率48%の石炭ガス化複合発電（IGCC）や効率55%の石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）にリプレースすれば、両国全体で、炭酸ガス発生量は38～45%減る。中国・インド共に石炭の産出国であり、燃料資源は不足しない。石炭は日本でも経済性があり、輸入炭使用で9円/kWhの発電コストと、天然ガスの半分以上である。

金子は、日本が石炭で安定した安い電力を得ることが、天然ガスの購入交渉でも立場を強め、日本経済の好転に資すると述べている¹⁰⁾。シェールガス革命の結果余剰となった米国のPRB炭を利用して、福島をIGCC特区とする構想を提案している。またこれを契機に、IGCCを日本の輸出産業にすることを提唱している¹¹⁾。

こうした意見を受け、政府も石炭火力の新増設を再開することとし、環境アセスメントにおいても、BAT（Best Available Technology）の採用を条件として、認めることとした¹²⁾¹³⁾。概ね、Jパワーの磯子火力発電所（横浜市）が基準になるとされている。

また先に1章で述べたように、2014年4月に制定された新たなエネルギー基本計画では、石炭も「重要なベースロード電源」と位置付けられ、最新技術導入による高効率化促進などが、政策として掲げられた。

たしかに石炭火力発電は、炭酸ガスの発生量が天然ガス火力発電などに比して大きく、この点が懸念されるところであるが、二国間オフセット・クレジットやCDMの取得など、我が国の優れた発電技術等の国際展開による排出削減等の取組も可能であろう¹³⁾。中長期的には、原子力・水素エネルギー・再生可能エネルギーの進展を待つところ大である。

石炭に限らず、天然ガスなどを燃料とした火力発電については、発電効率が極めて高いトリプルコンバインドサイクル発電システムの導入が目指されている。これは、燃料をガス化後、SOFC（固体酸化物形燃料電池）+ガスタービン+蒸気タービンで発電するものであり、天然ガスの場合で70%、石炭の場合で55%の発電効率が期待される¹⁴⁾。こうした効率の向上により、炭酸ガス発生量を抑制することが提唱されている。

しかし米国のオバマ大統領はCO₂の排出規制（500g/kWh以下）を打ち出し¹⁵⁾、石炭火力の新設を事実上禁止しようとしている。確かに既設プラントは外されており、EUも反対しているが、次第に抑制傾向に向かうであろう。原子力や水素エネルギーにシフトすることが求められる。米国に習って天然ガスにシフトするのは、日本の場合コスト高になるので、望ましい方向ではない。

(3) 今後の原子力

先に1章でも述べたように、2014年4月に制定された新たなエネルギー基本計画では、原子力は「重要なベースロード電源」と位置付けられ、政府は再稼働を容認しつつ、「依存度は可能な限り低減させる」とした。

これは世論を慮った極めて良くわからない方針であり、ではどうするのかは、今後の検討に待つところ大である。ここでは、こうした判断を下すうえでも押さえておかねばならない諸点について、検討したい。

（原子力の危険性）

原子力はどの程度危険なのか、対応策は無いのか考える必要がある。2点について指摘したい。

まず、炉心溶融を原理的に起さない高温ガス炉の開発が提唱されている¹⁶⁾。これは冷却材にヘリウム、減速材に黒鉛を用いるものであり、福島第1原子力発電所のような軽水炉とは異なり、水素爆発など起すことはない。現在の原子力発電所で人家に接近している個所から順次、この高温ガス炉（HTGR）に切り替えていくことが考えられる。この炉は大量の冷却水を必要としないので、海岸線に置く必要はなく、内陸に立地でき、津波に襲われることもない。

また、原子力発電所の立地場所についても考える必要がある。原子力施設の近傍に人家がなければ、事故が起きても被害は僅少であると思われ、できるだけ僻地に立

地させることが考えられる。この際、送電距離が長大となり、送電ロスが嵩むことが懸念されるので、例えば発生した原子力エネルギーで水素を製造して、シクロヘキサンや液化水素の形で、あるいはガスパイプラインを通じて需要地まで送ることが考えられる。

(放射性廃棄物の処分)

次に放射性廃棄物の処分問題がある。原子力発電は本当に「トイレのないお宅」なのだろうか？

放射性廃棄物の処分については、地層処分を行うこととされている。これは地下300mの地層中に放射性廃棄物を処分しようとするもので、その処分地を政府は公募しているが、未だ希望する地方自治体は無い。今後は政府の方から持ち掛けるとされている。ただし、放射性廃棄物の人体への影響が天然ウランと同程度になるには約10万年かかるとされている。これを高速炉で約300年まで短縮することが提唱されている。この面の研究を日本とフランスで共同実施することが合意された¹⁷⁾。

高速炉はナトリウムを媒体に用いるので危険視する向きもあるが、電気陰性度の高い金属ナノ粒子をナトリウム中に分散させることで、化学活性度を抑えて、爆発や急激な加熱を抑えることが技術開発されている¹⁸⁾。またナトリウムではなく、より反応性の低い鉛・ビスマス液体金属を用いることも提案されている¹⁹⁾。

(原子力の持続可能性)

あるいは、ウラニウムやトリウムは枯渇性資源であるので、原子力は持続可能ではないという意見がある。しかし昨年も報告したように³⁾、統合型高速炉 (Integral Fast Reactor) (図-2) を用いれば、ウラニウムやトリウムに含まれるほとんど全ての核分裂エネルギーを抽出でき、現在の原子炉に比して燃料資源消費量を2桁削減できるので、数千年は対応できることになる。さらに海水中の

ウランを抽出すれば、人類のエネルギー需要を50億年支えることができ、太陽光や風力に匹敵する持続可能なエネルギー源となる¹⁹⁾。

こうした核分裂タイプの原子炉の他に、核融合炉が開発中である。これが実用化すれば、半永久的に持続可能なエネルギー源となる。

(原子力のコスト)

以上をすべて含めると、原子力のコストが高騰し、自然エネルギーや化石燃料に比して経済的でなくなるという、世間の思い込みがある。たしかに石炭などの化石燃料に比して経済性が優れているのか今後の検討が必要であるが、原子力は炭酸ガスの排出が少ないという利点があるので、IPCCの言うように地球温暖化が懸念されるのであれば、原子力に優位性があると思われる。

また、自然エネルギーには水力発電や地熱のように経済優位性があるものもあり、こうしたエネルギーを水素の形態で運んでくれば、低廉なエネルギー源となることが期待される。ただし、こうした低廉な自然エネルギーは希少であるとも考えられ、多くは太陽光や風力のように、安定した低廉なエネルギー源であるとするのには無理があるものである。やはり、原子力は自然エネルギーより経済性はまさっている。

(統合型高速炉)

究極の原子炉として統合型高速炉が提案されている²⁰⁾ (図-2参照)。これは米国のArgonne研究所が開発したもので、固有安全性を持ち、全電源喪失下でも、運転員が何もしなくても自然に事故が収束する。

原子炉と使用済み燃料の再処理施設が同一敷地内にセットになっており、高い核不拡散性を有している。

さらに先に述べたように、この原子炉はほぼ半永久的に持続可能なエネルギーを全ての人類に提供できる。

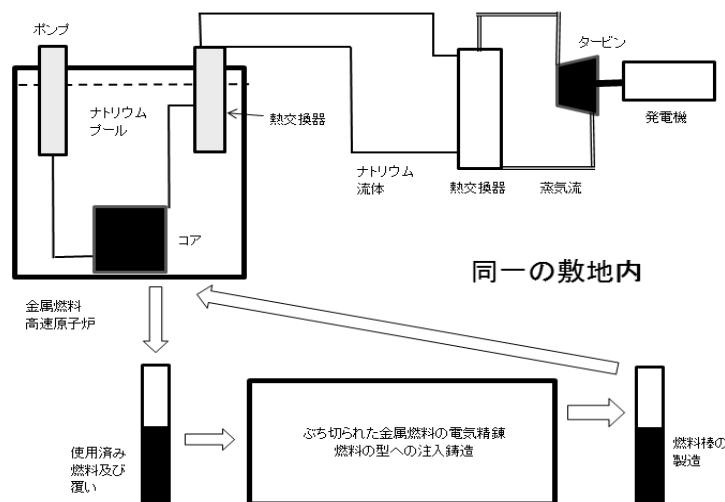


図-2 統合型高速原子炉の概念図 (2013年7月, 2014年6月に再掲)

米国では政治的圧力のため中断しているが、この再スタートが望まれる。

(4) その他

日本の大陸棚には大量のメタンハイドレート資源があるとされている。当面はコスト的に引き合わないようであるが、将来的には安定的な天然ガス源となることが期待される。

自己熱再生技術により、化学プラントなどの熱エネルギー消費は1/5～1/20に減少するとされている²¹⁾。このシステムは、燃料の燃焼や加熱なしに、熱の循環利用を可能ならしめるものであり、加熱炉やボイラーをコンプレッサーや熱交換器で置き換えようとするものである。このアイディアはエクセルギー再生原理を応用するものであり、エネルギーカスケディングよりも本質的に優れている。このシステムはほとんどすべての熱プロセスに適用可能であり、エネルギー需要をドラスティックに削減するものである。

熱交換器の効率は地中熱の利用により大幅に向上し、省エネルギーとなり、温暖化ガスの排出を抑制する²²⁾。地中熱ヒートポンプシステムには、水・不凍液を循環するクローズドループシステムと、地下水を利用するオープンループシステムの二つがある。クローズドループシステムを利用した東京スカイツリータウンでは年間炭酸ガス排出量48%削減、オープンループシステムを利用した高崎地域冷暖房で年間炭酸ガス排出量24%削減と報告されている。オープンループシステムは、井戸を掘れば良いだけなので、設置がより容易であると考えられるが、地下水利用の規制緩和が必要である。

在来型の地熱発電は温泉に悪影響があると疑われ、なかなか進展していない。この対策として、高温岩体発電や涵養地熱系（EGS）発電が提唱されているが、多量の注入水損失と誘発地震というリスクがある。近年、熱水循環層下部の熔融マグマ周辺の固結マグマで、延性帯EGS発電を行うことが提唱されており²³⁾、こうした問題をすべて回避できるとされている。これは、500℃の延性帯で人工的に割れ目を作って、水を注入して蒸気にして発電しようとするものであり、注入水損失が少なく、また結果として地震を誘発することもない。今後の地熱開発のキーとなる技術であると考えられ、特に東北地方などで、今後の進展が期待される。

3. まとめ

本文のまとめを図-1のエネルギーインフラシステム図（2014年6月）に示す。その概説は以下のとおり。

（水素エネルギー社会）

水素は各種の化石燃料・原子力・再生可能エネルギーにより生産され、燃料電池自動車や水素発電所の燃料として用いられる。

水素は液化水素／シクロヘキサン・水素タンカーやパイプラインを通じて、生産地から消費地まで輸送される。

水素は電気に比して長距離輸送に適しており、貯留効果があるので、電線網と併設してその輸送インフラを整備することが求められる。

（石炭などを用いた高効率火力発電）

トリプル複合発電などの高効率火力発電を行う。燃料は天然ガスまたは石炭から得る。将来的には水素ガス主体の燃料で発電する。特に現時点では、エネルギー安全保障及び経済性確保の観点から石炭にシフトすることもやむを得ないが、中長期的には抑制せざるをえない。

必要に応じ炭酸ガス回収・貯留（CCS）を行う。

（原子力の継続）

原子力を継続する。現在のものより格段に安全性を高めた施設を構築する。

統合型高速炉などの先端的な原子力発電施設を開発する。また核融合を研究開発する。

参考文献

- 1) 日本経済新聞, 2014/4/14.
- 2) 日本経済新聞, 2014/4/23.
- 3) 水谷潤太郎：持続可能な地域社会の物的構成－2013年バージョン－, 第21回地球環境シンポジウム講演集, 土木学会, pp.191-200, 2013/9.
- 4) Mizutani J.: Sustainable energy infrastructure system, *Proceedings of the 6th Civil Engineering Conference in Asian Region (CECAR-6 at Jakarta)*, 2013/8.
- 5) 山地憲治・笹倉正晴：将来エネルギーとしての水素の可能性, エネルギー・資源, Vol.35, No.1, pp.19-24, 2014/1.
- 6) 水谷潤太郎：持続可能な地域社会の物的構成－2012年バージョン－, 第20回地球環境シンポジウム講演集, 土木学会, pp.1-12, 2012/9.
- 7) 安井誠（千代田化工建設株式会社）：水素の大量貯蔵・輸送技術（SPERA 水素）の開発, *nano tech 2014 Life & Green Nanotechnology 特別シンポジウム講演集・講演3*, 2014/1/29.
- 8) 西村元彦・吉野泰・吉村健二・原田英一（川崎重工業株式会社）：CO₂フリー水素の導入構想, エネルギー・資源, Vol.35, No.1, pp.43-46, 2014/1.
- 9) 橋本彰：日本のエネルギー改革, 低炭素社会実現のためのエネルギー工学研究会・第4回低炭素社会技術フォーラム・日本のエネルギー改革－2030年を目指して－講演資料集, 東京大学, pp.169-197, 2013/2/22.

- 10) 金子祥三：石炭と日本の将来，先端エネルギー変換工学寄付研究部門第 4 回技術フォーラム・日本のエネルギーの 50 年と今後一過去の経験に学び確かな未来を一講演資料集，東京大学，pp.5-1～5-52，2013/5/17.
- 11) 金子祥三：高効率発電技術と石炭の役割，第 11 回 AECE 技術フォーラム・世界のエネルギー情勢と石炭利用技術の動向講演資料集，東京大学・先端エネルギー変換工学寄付研究部門，pp.2-1～2-40，2014/2/25.
- 12) 日本経済新聞，2013/4/25.
- 13) 経済産業省・環境省：東京電力の火力電源入札に関する関係局長級会議・取りまとめ，2013/4/25.
- 14) 小林由則（三菱日立パワーシステムズ株式会社）：分散電源としての燃料電池の可能性（大型次世代燃料電池 SOFC の開発状況と今後の展開），第 18 回 CEE シンポジウム・固体酸化物形燃料電池の新たな展開・講演要旨集，東京大学・エネルギー工学連携研究センター，pp.39～55，2014/4/25.
- 15) 金子祥三：技術革新こそすべての鍵，第 12 回 AECE 技術フォーラム・エネルギーを取り巻く課題と今後講演資料集，東京大学・先端エネルギー変換工学寄付研究部門，pp.3-1～3-42，2014/6/13.
- 16) 湯原哲夫（（一財）キャノングローバル戦略研究所）：地球温暖化問題とエネルギー戦略，第 5 回東大エネルギー・環境シンポジウム・岐路に立つ日本のエネルギー戦略・講演資料集，東京大学エネルギー・環境研究アライアンス，エネルギー工学連携研究センター（CEE），先端エネルギー変換工学寄付研究部門，pp.2-1～2-18，2013/10/30.
- 17) 読売新聞，2014/4/29.
- 18) 荒邦章：ナノ粒子分散ナトリウム的高速炉への適用化技術の開発，原子力システム研究開発及び原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ資料集ー平成 25 年度成果報告会，文部科学省・科学技術振興機構，pp.29-32，2014/2/27.
- 19) <http://www.sustainablenuclear.org/PADs/pad11983cohen.pdf>
- 20) Till C. E., Chang Y. I.: PLENTIFUL ENERGY – The story of the Integral Fast Reactor – The complex history of a simple reactor technology, with emphasis on its scientific basis for non-specialists, ISBN: 978-1466384606, 2011.
- 21) 堤穀司：エネルギーカスケーディングからエクセルギー再生へ，第 11 回コプロワークショップ「エネルギー・物質の併産（コプロダクション）およびエクセルギー再生による革新的省エネルギーと次世代産業基盤の構築」講演要旨集，東京大学・エネルギー工学連携研究センター，pp.1-19，2012/2/2.
- 22) 笹田正克，内田洋平，大岡龍三，今野真一郎，石上孝：日本を元気にする産業技術会議シンポジウムー再生可能エネルギーとしての地中熱活用に向けた将来展望，産業技術総合研究所／日本を元気にする産業技術会議，2012/6/8.
- 23) 村岡洋文（弘前大学・北日本新エネルギー研究所・地球熱利用総合工学部門）：注入水損失と誘発地震を抑制する延性帯利用涵養地熱系発電，青森発新技術説明会資料集，科学技術振興機構，pp.21-28，2014/3/13.

Sustainable Energy Infrastructure System -2014 Version-

Juntaro MIZUTANI

IPCC has pronounced a report of greenhouse gases emission and its reduction, and demands people concerned to take drastic responses. Meanwhile, new energy master plan of Japan lines up the renewable energy and the nuclear one as the basic energy source; however, it is unclear how to cope with IPCC's request. Especially, decision should be made on the way of greenhouse gas reduction in the coal exhaust gas; conducting CCS (carbon capture and storage) or drumming up the nuclear power?

Energy infrastructure figure shown at the 21st Symposium on Global Environment (2013) remains unchanged now and in the future.

This year, such items as the hydrogen energy society, the coal utilization and the nuclear power generation are studied.

Hydrogen is expected to be the next generation basic energy medium, and its cheap transportation technology should be developed. The toluene - cyclohexane system or the liquid-hydrogen system is the major candidates for this purpose.

Coal utilization as the basic electronic power supply is imperative, because it is a cheap and stable energy source. Efficient technology such as the triple combined cycle power generation should be applied. However, it must be replaced by the nuclear power or the hydrogen in the medium and long terms.

Concerning nuclear power, restart of existing plants must be pushed now. Essentially safe system such as the high-temperature gas reactor and the integral fast reactor (IFR) should be developed. Nuclear power can become the sustainable energy source with this integral fast reactor technology, and its development should be pursued in the same way as the nuclear fusion reactor.

As for the renewable energy, cheap sources such as the ductile zone EGS geothermal power generation or large scale hydropower generation (in foreign countries) should be pushed.