

「CO2削減とイノベーション」研究会 第10回研究会報告

「大震災の教訓とエネルギー問題の課題と解決策」 2011.5.23

金子祥三 氏(東京大学生産技術研究所 特任教授)



2011年3月、東北地方を襲った大震災の影響で、東日本太平洋岸に立地する発電所のほとんどが停止する、という状態に陥った。今後、おそらく日本のエネルギー計画は大きな見直しを迫られることになるだろう。震災後はじめての開催となった今回の研究会では、本研究会の発足メンバーである金子氏に改めて講演をお願いした。火力発電プラントの設計に過去従事されてきたお立場から、発電所の被災状況を分析いただき、あわせて、原子力発電の喪失分をどうするか、今後の日本のエネルギー動向と火力発電の将来像についても語っていただいた。

【講演要旨】

東日本大震災における発電所の被災状況をみると、大半の被害は、地震よりも津波によるものと考えられる。特に、火力発電所の場合、もともと地震に強い構造を持つが、燃料のほとんどを海外から輸送している関係上、多くの発電所が海岸に立地しており、今回、そのことが津波による浸水、冠水の被害を大きくしてしまった。現在のところ、水没してしまった発電所の復旧には半年～2年を要する見込みで、2011年3月末の時点では、火力発電所(広野・常陸那珂・鹿島)と共同火力分(相馬共同火力新地・常盤共同火力勿来・クリーンコールパワー)とで1126万kW、原子力発電所分もあわせると、東京電力の総発電能力の30%強を喪失している状況にある。

2010年6月に閣議決定したエネルギー基本計画では、2030年の電源構成について原子力の比率を50%とする一方、火力の発電電力量を半減させることでCO2の発生量を半分に抑える、という見通しを立てていた。しかし、今回の震災を踏まえると、今後は原子力発電所の新設をあきらめ、既設のものだけで動かしていくという選択もやむをえなくなる。とすれば、その原子力エネルギーの喪失分をいかに代替するか、という問題が当然起こってくる。再生エネルギーへの期待が高まっているが、残念ながら、太陽光発電、風力発電では容量的に難しく、天然ガスもセキュリティ上に難点がある。やはり、改めて重要になってくるのが火力発電で、いかに燃料を確保し、火力発電を高効率化していくかが肝要となる。

火力発電の高効率化の現状としては、蒸気タービン入口蒸気の高温・高圧化が目指されているが、蒸気タービン単独では、すでに40%強の効率まで達しており、これ以上の高効率化には耐高温材料が鍵とならざるをえない。しかし、日本には耐高温材料の具体的な開発プロジェクトがなく、材料による高効率化は残念ながら望めそうもない。ところが、ガスタービンと蒸気タービンを複合させたダブル複合発電であれば、無理をすることなく効率を上げていくことができる。それだけでなく、将来的にはトリプル複合発電も視野に入れて、そこにさらに燃料電池を組み合わせれば、究極の高効率化も可能である。今回の震災を契機に、従来のエネルギー計画を見直す必要に迫られているが、現状では再生エネルギーにも限界や制約がある以上、火力発電の技術革新が今後の日本のエネルギー動向を支えることになるだろう。

(文責:藤井由紀子)

大震災の教訓とエネルギー問題 の課題と解決策

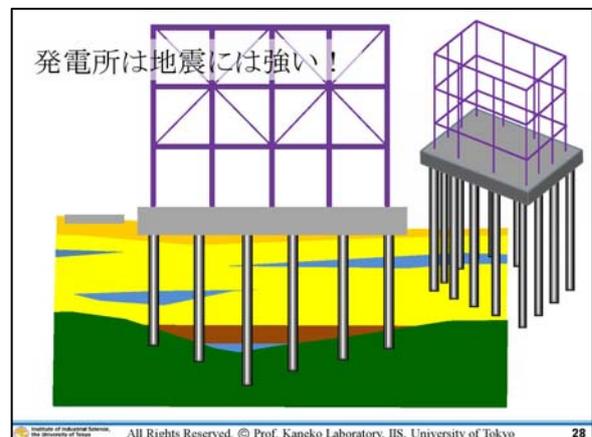
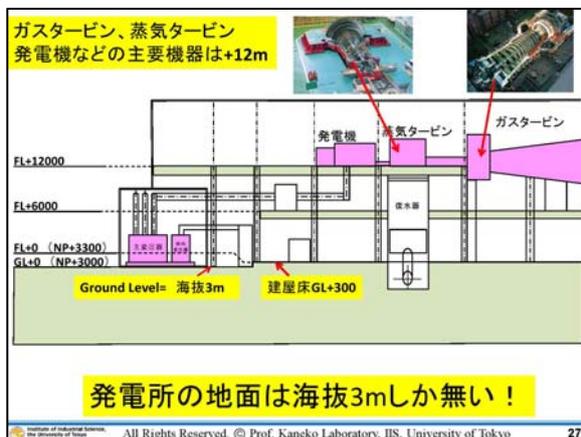
2011年5月23日
東京大学生産技術研究所
特任教授 金子祥三

火力発電所はもともと地震に強い

以下、金子氏講演録からの抜粋

金子談: 火力発電所の復旧の見込みについては、長いものは1年以上ですが、さいわい津波が1.5m~2mしか来なかった場所では3~4ヶ月で何とか復旧が可能なものもごございます。遠浅になっている場合は、それほど激しい勢いで打ちつけるような津波ではなかったんですね。

また、火力発電所はもともと地震には強くて、バイタルパートが地震でめちゃめちゃにやられた、という話はあまり聞いたことがない。ボイラーにしても、蒸気タービンにしても、ちょっとズレたとか、止まってターニングが少しできなかつたとか、ボイラーのエレメントが壁にぶち当たってちょっと凹んだとか、場合によってはちょっと水が漏れたとかいうのはありますけれど、致命的なダメージというはまずない。



今回も軽くやられてはいるんですけども、肝心の蒸気タービンとか、ガスタービンとか、発電機とかという、一番バイタルなパートはやられていない。なぜかという、これは万国共通なんですけれども、バイタルパートというのは、だいたい地上 12~13mのレベルにあるわけです。だから、仮に 10mの津波が来ていたにしても、この発電機、蒸気タービン、ガスタービンが水浸しになる、ということとはなかったらと思うます。

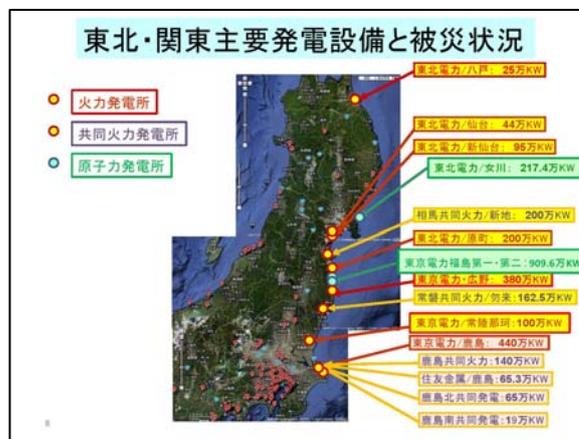
それに、ボイラーについては耐震計算もやりますし、バイタルパートをマットという、3m~5mぐらいある鉄筋コンクリートの塊のブロックの上に乗せている、ということもあります。たとえば、常盤共同火力勿来発電所の地区は、鮫川という河口にありまして、ものすごく軟弱な地盤ですが、基礎工事をやるときに水を抜いて、何百本という杭を打ち込んで、地盤をものすごくがっちり固めています。その上にマットがあるわけですから、コンクリートのブロックが浮かんでいる船みたいなもので、この上に載っているメインの蒸気タービン、ガスタービンなどは、まず大丈夫です。ですから、今回の場合も、地震でやられたというよりは、やっぱり津波で海水と泥に埋まってしまったということが、事態を非常に大変にしている、という状況だと考えられます。

では、なぜ津波の被害が大きいのかといいますと、日本の発電所は火力、原子力を問わず、すべて海岸にあるんです。北海道の奈井江発電所と砂川発電所という 2カ所だけが内陸で、あとは全部海岸に面している。もちろん、海岸線の長さ、立地のしやすさということもありますが、天然ガスにしる、石炭にしる、油にしる、全部海外から燃料を船で持ってくるわけですから、内陸の横持ち輸送をやる手間ひま、費用を考えると、直接港湾で受け入れて直接使うのが一番合理的です。燃料のほとんどが輸入という実情を考えると、どうしてもやっぱり海岸のすぐそばの立地、ということにならざるをえないんですね。

1-1 発電設備の被災状況

1. 東日本太平洋岸の発電所はほとんど全部停止
2. 火力発電所は津波による浸水・冠水の被害
→復旧に3カ月~2年を要す
3. 大半の原子力発電所は低温停止状態
4. 東京電力福島第一発電所1~4号機が全電源喪失により低温停止に失敗、炉心燃料棒が熔融状態に
5. 今なお予断を許さず----冷却のための努力継続中

University of Industrial Sciences, The University of Tokyo. All Rights Reserved. © Prof. Kaneko Laboratory, IIS, University of Tokyo. 7



2011年3月末停止中の発電所(東京電力)

<ul style="list-style-type: none"> [原子力発電所] ・福島第一: 470万kW ・福島第二: 440万kW 	合計 910万kW	} 1830万kW
<ul style="list-style-type: none"> [火力発電所] ・広野 (重油・石炭): 380万kW ・常陸那珂 (石炭): 100万kW ・鹿島 (重油): 440万kW 	合計 920万kW	

停止中原子力・火力 = 1830万kW / 総発電能力6000万kW = 30%を喪失

[共同火力分] 相馬共同火力新地(石炭): 200万kW × 1/2 = 100万kW
 常盤共同火力勿来(石炭): 162万kW × 1/2 = 81万kW
 CCP:IGCC(石炭) : 25万kW
 合計 206万kW

合計2036万kW/6000万kW = 33%

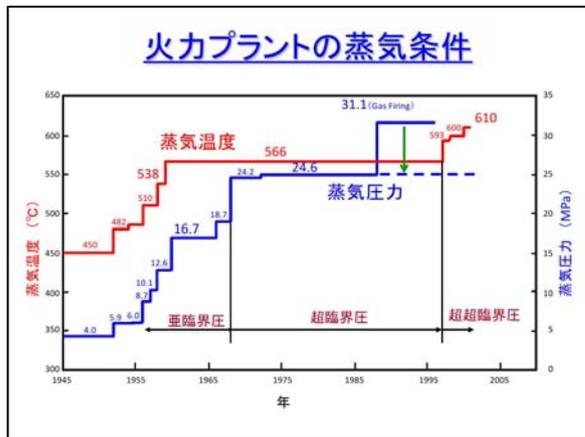
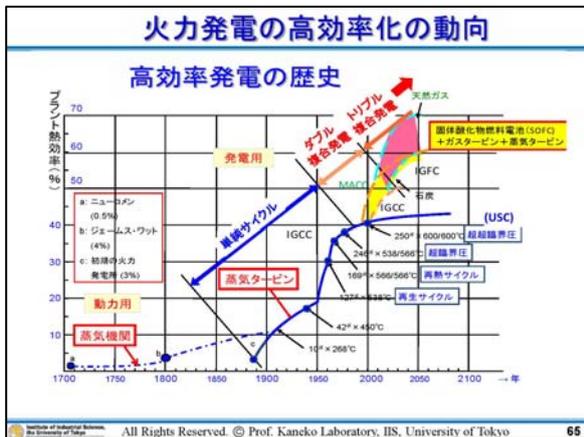
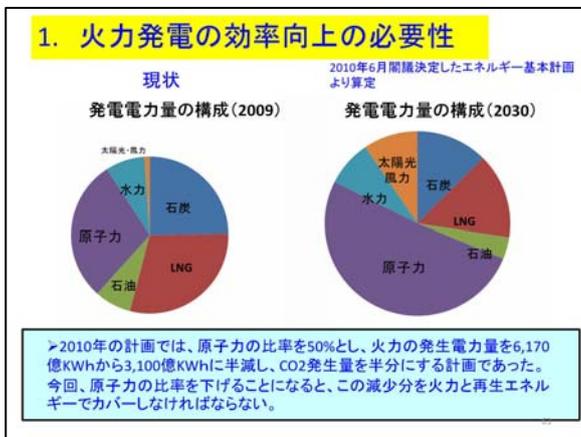
University of Industrial Sciences, The University of Tokyo. All Rights Reserved. © Prof. Kaneko Laboratory, IIS, University of Tokyo. 1

火力発電の高効率化—蒸気タービンの単体での限界

金子談:20世紀の発電は、蒸気タービンの時代です。蒸気の圧力と温度とをずっと上げていって、今この USC(超々臨界圧)という、600℃ぐらいの蒸気温度のところまで来ているんです。プラント熱効率としては、だいたい40%ちょっとぐらいのところまで来ているんですけども、この後はもう高温に耐える材料ができない限り効率は上がらない。それで、今、ヨーロッパでは700℃とか、750℃を目指して、効率をぐんぐん上げていこうという計画があるんですけども、鉄系の材料では頑張っても620℃までなんです。ですから、700℃とか、750℃になったら、ニッケル合金というガスタービンの材料を使わなきゃいけない。

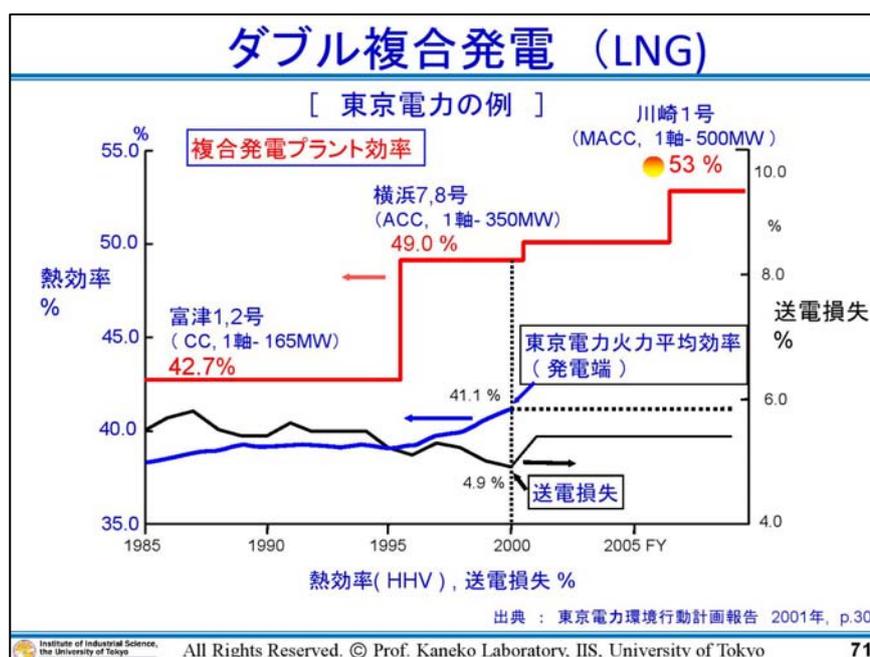
ところが、今、ガスタービンに使われているものは、ブレードとか、ケーシングとか、実に小さなものなんです。それに対して、主蒸気管とか、蒸気タービンのケーシングとか、大きなものを作っていかなければいけませんから、新しいニッケル合金の材料を開発しなければいけないんですけども、残念ながら、この材料開発のプロジェクトが日本にはないんです。それに、これはものすごくお金がかかる。何十億円とお金がかかりますし、10年近い年月がかかるんですけども、残念ながら今それだけの予算とプロジェクトを日本は持っていないんです。だから、日本では、このニッケル合金を使った蒸気タービン単体での効率向上というのは、少なくとも10年以内にはできないんです。

ということで、蒸気圧力と蒸気温度を上げてきて、今ですと、620℃ぐらいまではいこうといわれているんですけども、蒸気タービン単体では壁にぶち当たってしまった。ところが、ガスタービンと蒸気タービンとを使ってダブルで発電すれば、そんな無理をしなくても効率は楽々と上がりますよ、という方法がダブル複合発電なんです。



金子談:ダブル複合発電(ガスタービンと蒸気タービンの組み合わせ)、特に天然ガス(LNG : Liquidized Natural Gas)による複合発電は、実は今、もう全盛期です。全電力会社が必死になって、従来型ボイラと蒸気タービンの天然ガス焼きプラントを、ガスタービンと蒸気タービンの複合発電に切り替えています。この方法が今みたいな時に非常にいいのは、最短で1年以内ぐらいで、半分ぐらい出力を取ろうと思えば取れるんですね。まず、ガスタービンだけつけて、半分ぐらいパワーを出す。そして、将来、蒸気タービンをくっつけて、さらに排ガスボイラーをくっつけて効率を上げていく。だから、出力が足りないという欠点をカバーしつつ、そういう2段階で将来的には効率を上げていって、CO2も思い切って減らす、というやり方ができるんです。

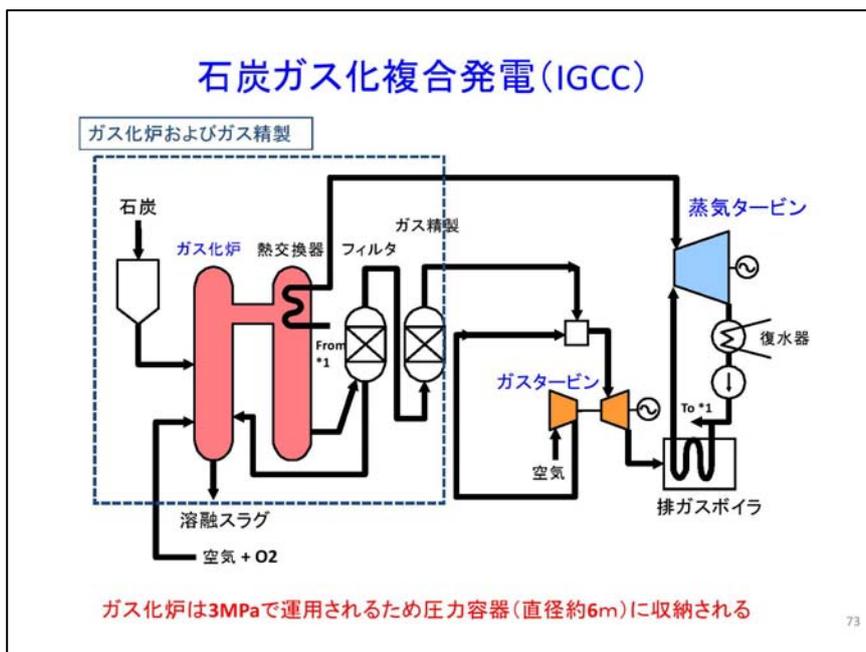
プラント熱効率をみますと、従来の蒸気タービン単独では 41~42%ぐらいしかいかないわけですが、この天然ガスの複合発電は42%からずっと上がってきて、今もう53~54%です。でも、これは高位発熱量基準ですから、低位発熱量基準にすると 60%ぐらいの数値になります。非常に高効率になっています。だから、今までのものに比べると、同じ電気を得るのに燃料が3割少なくて済むとか、そういった革新的な技術革新が今なされているわけです。



しかし、これは残念ながら天然ガスでの話なんです。では、石炭の燃料に対して複合発電ができないのか、ということで出てきたのが、IGCC(石炭ガス化複合発電)です。固体である石炭をガス化してガス燃料すると、基本的にはガスタービンで燃やしますから、天然ガスと同じように複合発電ができるし、効率もぐっと上がってくる。ちなみに、現在、東京湾岸 2400 万 kW は、LNG 火力が中心ですね。でも、LNG が来なくなったら全部アウト。これは残念ですし、リスクも大きい。ところが、幸いなことに、石炭ガス化炉をつくれれば、ガスタービンが使えるわけです。カロリーの違いとか、修正しなければいけないところはありますが、基本的にダブル複合発電というのは、石炭をガス化しさえすれば、そのまま互換性がある。天然ガスだ、石炭だと言っているけれど、ガス化しさえすれば既設の

天然ガスだきのガスタービンでも、コンバスターを一部改造して使えるんです。非常にインターチェンジャブルで、そこはガス化という技術が橋渡しをするんだ、ということです。もちろん、天然ガスはサラブレッドですから、効率も高いし、クリーンでビューティフル、それはもう決まっているけれど、それで荷馬車を引けといたって骨折して引けない。だから、やはり石炭を使えるようにして、天然ガスだけに集中しないようにしなくてははいけない。

それに、IGCC はセキュリティー対策にもなる。それから、液体燃料の製造も可能になります。石炭のフレキシビリティを非常に広げますから、セキュリティーのためにも石炭は使わなきゃいけない。しかも、それをクリーンに使える技術というものを、ここで確立しておかなければいけない、と思えます。

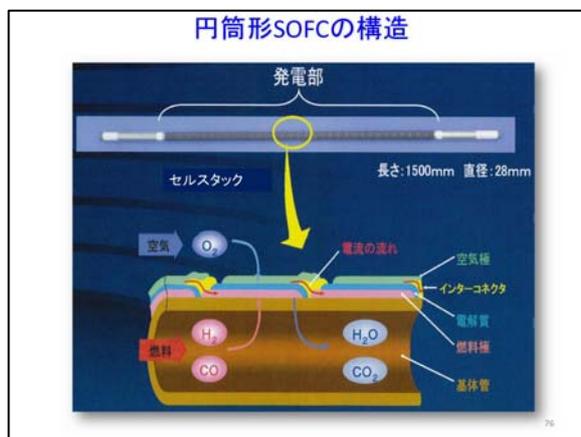
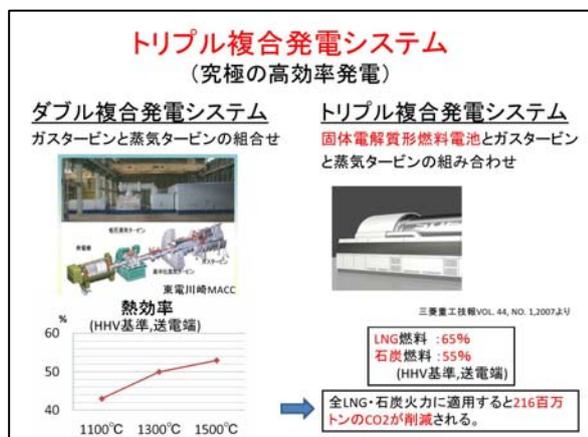


トリプル複合発電システムとは

金子談: 火力発電の今後の展開についてですが、石炭ガス化トリプル複合発電 (IGFC) という方法があって、固体電解質形燃料電池 (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) を、ガスタービン、蒸気タービンに組み合わせたトリプルにすると、究極の高効率化が可能になります。まず、石炭をガス化して SOFC で 50% ぐらいのパワーを取ります。その後、ガスタービンに入れて燃やして、ガスタービンで電気を作るわけです。つまり、SOFC の排熱で蒸気を起こして、蒸気タービンまで徹底的にエネルギーをしゃぶり尽くす。こうすることによって、石炭でも 55%、天然ガスだと 65~70% に近い効率が達成できるという、究極の高効率発電が可能になる。

この方法の一番の利点は、ダブル複合発電のコンバインドサイクルが、ある意味ではそのまま使えるということです。無駄にならないんです。出力も増えるし、効率も上がる。SOFC というのはセラミックスできていて、1000℃ に近い高温で作動しますが、これをトッピングに付け加えることによって

高効率化できる、というのが利点です。だから、今続々とガスタービンのコンバインドサイクルを建設しています。あるいは、IGCC が建設されても、それが無駄な投資にならない。そこがいいところですね。

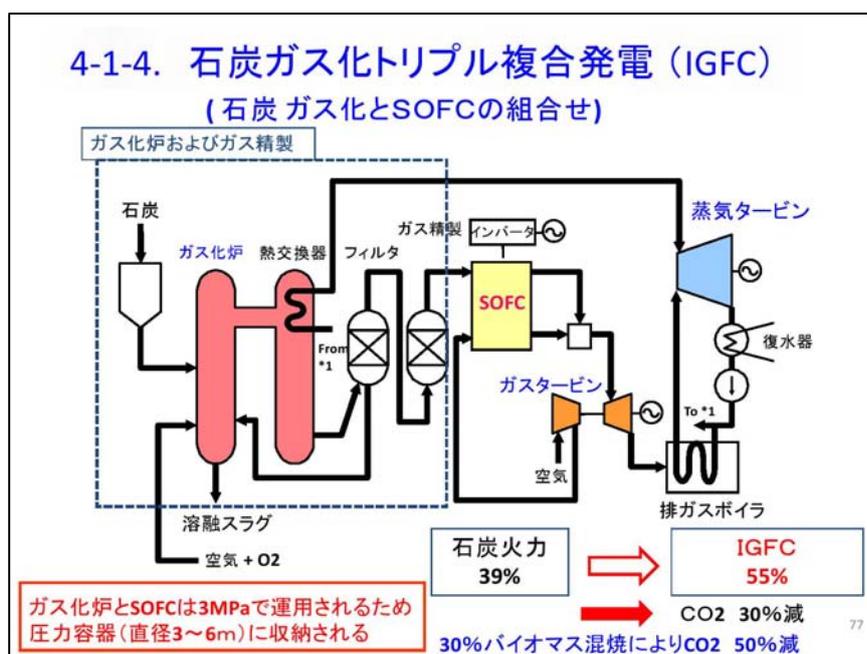


また、みなさん、燃料電池というと、「すぐ水素でしょう？」とおっしゃるんですけど、この SOFC は水素とは全然関係がないんです。なぜかという、普通のポリマーの燃料電池は水素イオンが移動するので、水素イオンだけが電気になるんですが、SOFC は酸素イオンが移動しますから、一酸化炭素 (CO) でも、水素 (H₂) でも、カーボン (C) でも、燃えるものなら基本的に何でもいいんです。たとえば、化石燃料は C と H からできていて、だいたいカーボンの方が多いわけです。生命体の定義は炭素を持つことですから。だから、天然ガスは比較的水素が多いですけども、それでも重量比で 75% が炭素で、水素は 25% しかない。油になると 85% と 15%、石炭だと 95% と 5% で、圧倒的に炭素が多いわけです。

一方、今、燃料電池自動車とか、いろいろいわれているポリマーを使った固体高分子形燃料電池 (PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell) というのは、水素しか利用できません。炭素の固まりである化石燃料の炭素を使えないんです。だから、あれは決して主流にはなりません。でも、SOFC は酸素が移動するわけですから、CO でも H₂ でもどちらでも等価で、しかも出力はほとんど変わりません。なので、そのまま利用できるわけです。そこがいい。しかも 1000°C の高温で作動しますから、排ガスでガスタービンも回せれば、蒸気タービンも使えるし、発電に使えるわけです。これに対して、燃料電池自動車のポリマーの燃料電池は 100°C で作動しますので、この排ガスでは発電はできません。お湯しか沸かない。しかも、低温で活性が低いから、白金をまぶした電極でないとイオン化しない。また、CO によって白金は疲毒しますから、CO を徹底的に減らして、ほぼ純粋に近い水素にしないと発電できない。

さらに、最大のまやかしは、天然に水素は存在しないということで、何かから水素を作らなきゃいけないわけです。究極は、原子力でできた水を電気分解して水素を作るとか、或いは太陽光で水を電気分解して水素を作るんだといっていますけれども、当面は化石燃料から水素を作らなきゃいけない。そうしますと、カーボンが大多数である化石燃料から水素だけに転換すると、理論的にも 2 割ぐらいエネルギーを損じます。水素を入れた後はビューティフルで、炭酸ガスを出さないとされているけれど、大事な化石燃料のエネルギーを半分ぐらい捨てて水素にして、それから使おうと

しているわけだから、こんなに効率の悪い話はない。非常にエネルギーロスが大きいですから、やはり水素の時代は来ないでしょう。したがって、燃料電池自動車も来ない。或いは、来てもニッチにしかならない。それに対して、SOFC はカーボンでも水素でもどっちでも等価に発電しますし、排熱が 1000°C ですから、これで十分サイクルが組めて発電ができる。だから、これが第 3 世代の発電、2030 年からはこのトリプル複合発電の時代になる。必ず IGFC の時代になりますよ。



本講演録の著作権は、ご講演者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本講演録に含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【magicc プロジェクト事務局】 藤井由紀子

一橋大学 イノベーション研究センター内

〒186-8603 東京都国立市中 2-1

TEL. 042-580-8434 e-mail: yukifuji@iir.hit-u.ac.jp