

石炭からの水素製造

長井 輝雄

東京電力株式会社 エネルギー・環境研究所
石炭・新燃料グループ

Hydrogen production from coal

Teruo Nagai

Coal & Advanced Fuel Technology Group
Energy and Environment R&D Center
Tokyo Electric Power Company

Coal is the most abundant and economical fuel of all the fossil fuels. However, it has a disadvantage in emission of huge amount of carbon dioxide when burnt directly. As the heat of combustion of coal shows, it has much energy and can be reformed to energetic hydrogen. From the energetic viewpoint, the hydrogen production from coal would be one of the most advantage processes. However, at the present time, this process takes more cost and this process is not commercialized yet. When the technology of gasification is advanced and also the social situation of energy is changed, the hydrogen production from coal would be the preferable process.

Key words: coal, hydrogen production, gasification

1. はじめに

石炭は、CO₂問題から将来的に使用しない方がよい燃料であるとの風潮があるが、石炭は資源量、賦存地域、等の観点から我が国のエネルギーセキュリティ上欠かすことの出来ない化石燃料であると考えられる。また、石炭中には水素も含有しており、技術的には石炭を基にした水素製造も可能であるが、現状では経済的に成立プロセスとはなっていない。今後の技術開発及び社会的なニーズにより石炭からの水素製造が成立する可能性もある。

2. 石炭の生い立ちと組成

(1) 石炭とは

石炭は、古代の植物(約3億年前~数百万年前)が地熱、地圧等の影響を受けて、長時間かけて化学的変化をおこした有機質鉱物である。このため、根源植物

の種類、生成環境、生成時間等により、様々な性状の石炭がある。また、この間生成環境周囲の土壌成分も石炭中に取り込まれることにより、石炭中には、灰分が含まれ、石炭の主な組成は、以下の元素からなる。石炭組成 C+H+O+S+N+鉱物(灰分) 石炭の根源は、前述の様に植物からなるが、概念的には、脱水、脱炭酸、脱メタン等により水素、酸素及び一部の炭素が木材から遊離して石炭が生成される。以下に炭素に対する木材と石炭の比率を示す。

木材 H : O : C = 1.5 : 0.7 : 1

石炭(瀝青炭) H : O : C = 0.8 : 0.15 : 1

実際の石炭は、水素、炭素、酸素、窒素、硫黄等の元素による有機質高分子(一部に金属元素との結合を含む)である。石炭の分子構造は、炭種によっても異なり色々なモデルが提唱されているが、一例として図1に石炭の分子モデル(Wiserのモデル)の一部を示す。

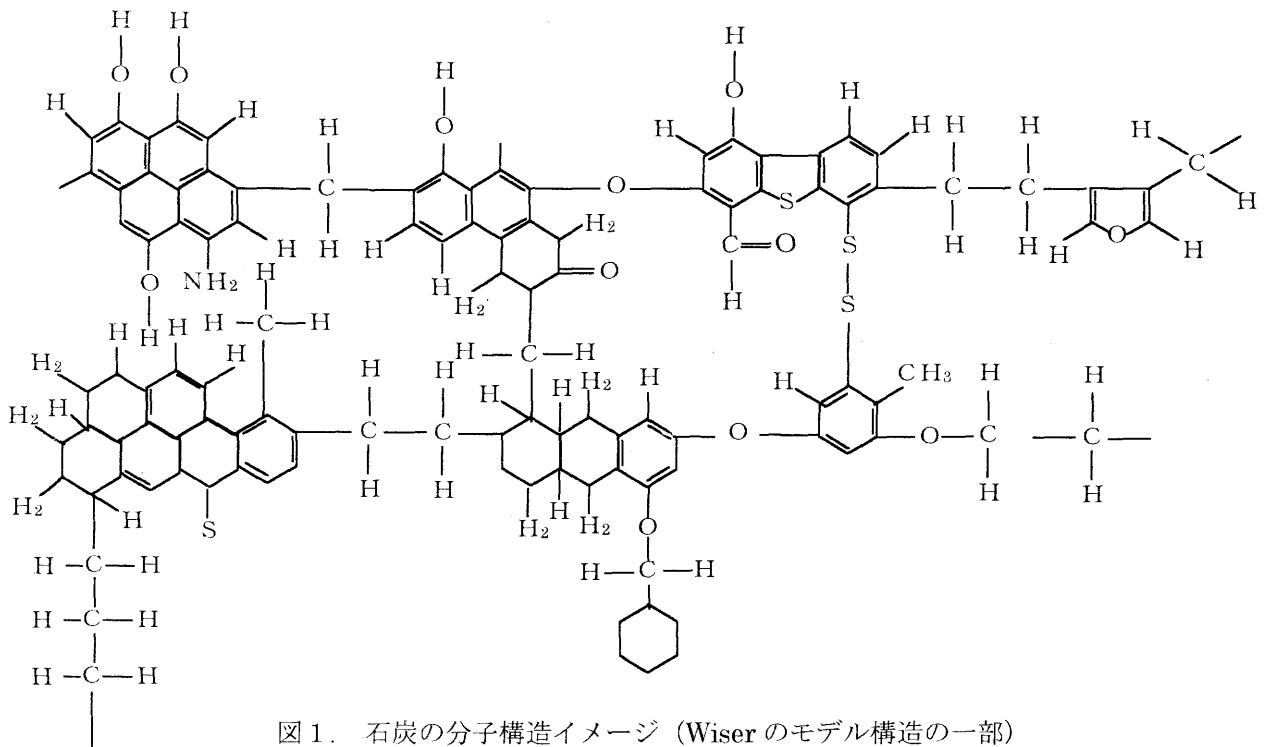


図1. 石炭の分子構造イメージ (Wiser のモデル構造の一部)

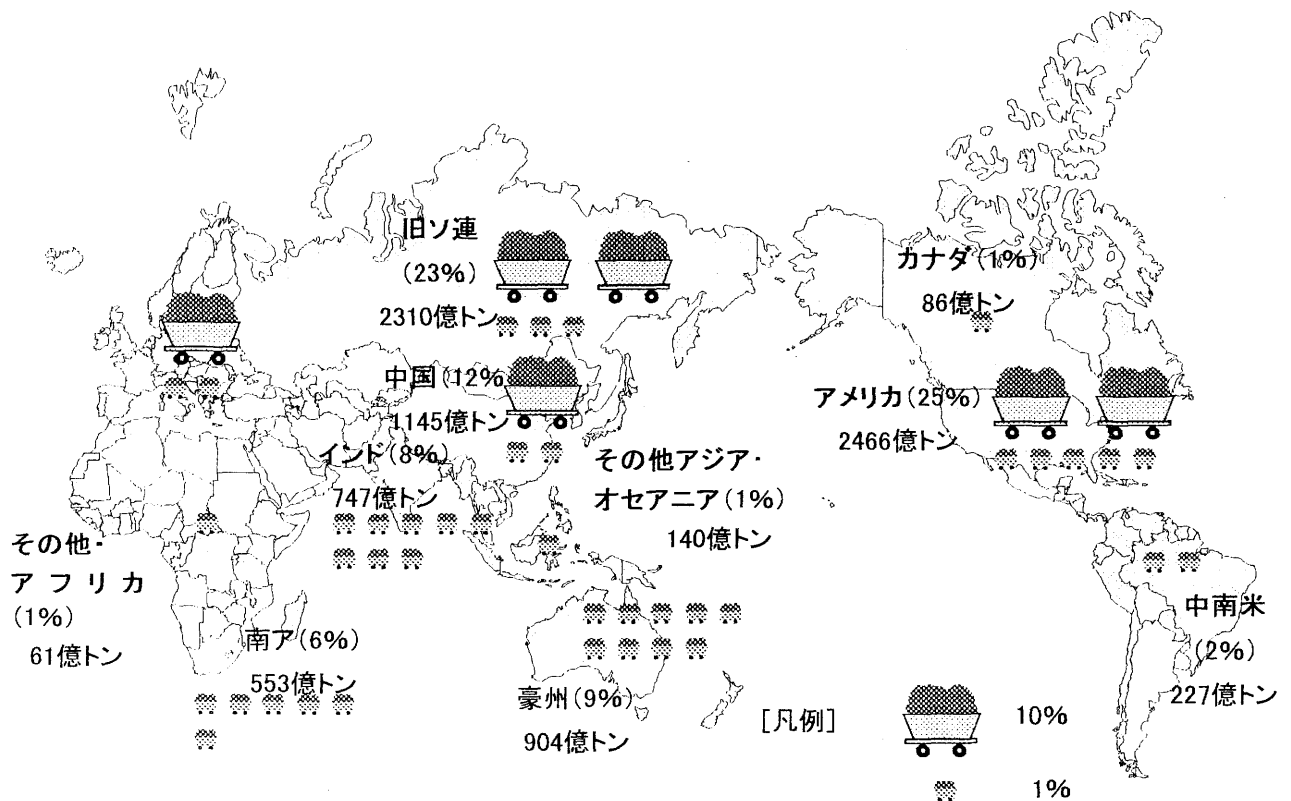


図2. 世界の石炭資源分布

(出所) 第16回世界エネルギー会議 (1998年10月)

(注) () 内の数字は世界の総量に対する割合 (%)

(2) 石炭の賦存量と世界の石炭分布

石炭は、表 1 に示す様にエネルギー源として他の燃料に比較し豊富に存在している他、一部地域に偏在することなく全世界に広く分布しているため、エネルギーセキュリティの高い燃料である (図 2)。

表 1. 石炭種別毎の埋蔵量

	埋蔵量	可採埋蔵量
瀝青炭・無煙炭	3.3 兆トン	0.5 兆トン強
亜瀝青炭・褐炭	3.9 兆トン	0.5 兆トン弱

(3) 石炭の持つ水素量

一般的には石炭は、有機質部分と無機質部分から構成されており、表 2 に石炭の元素分析の一例を示す。

表 2. 瀝青炭の元素構成例

元素	成分比 (%)
C	76.0
H	5.1
O	6.6
N	1.6
S	0.5
灰分 (無機質分)	10.0

各種の化石燃料中には水素が含まれているが、石炭の水素含有量 (重量ベース) は石油の約 1/3、天然ガスの約 1/5 となっている。非常に概略の値として、先述の化石燃料の賦存量の値を基に、燃料種別の水素賦存量を計算してみると以下の様になる。これによれば、かなりの量の水素が石炭として地球に賦存されていることがわかる (表 3)。

表 3. 各種燃料中の水素含有量

	石油	天然ガス	石炭
代表組成	C ₆ H ₆	CH ₄	C ₁₈₃ H ₁₄₇ O ₂₁
概算賦存量	1 兆 バレル	144 兆 m ³	1 兆 トン
概算水素含有率 (重量ベース)	15%	25%	5%
概算水素賦存量 (億トン)	195	300	500*

*石炭中の酸素が水素と結合している場合は、400

(4) 石炭のメリットとデメリット

燃料としてみた場合の石炭得失は、以下の通りである。

- メリット : 資源量が豊富
- 世界中に分布
- 他の燃料に比較して安価かつ価格が安定している
- デメリット: 燃焼させた場合に、CO₂の発生量が多い
- 固体であるため、ハンドリングが容易でない

3. 石炭からの水素製造プロセス

石炭から水素を製造するプロセスとしては、図 3 のプロセスフローが考えられる。この図は、石炭をガス化し、精製後天然ガスからの水素製造と同様な工程で水素系燃料を得る間接ガス化プロセスを示している。なお、石炭を乾留した場合でも、石炭中の揮発分がガスとして得られ水素源とすることができるが、石炭中の未反応炭素分が多く残る。ガス精製設備以降の各プロセスは、CO と H₂ 比が異なるが、基本的に天然ガスから改質により生成するガスとほぼ同等となるため、本稿では、ガス化とガス精製プロセスを主に記載する。

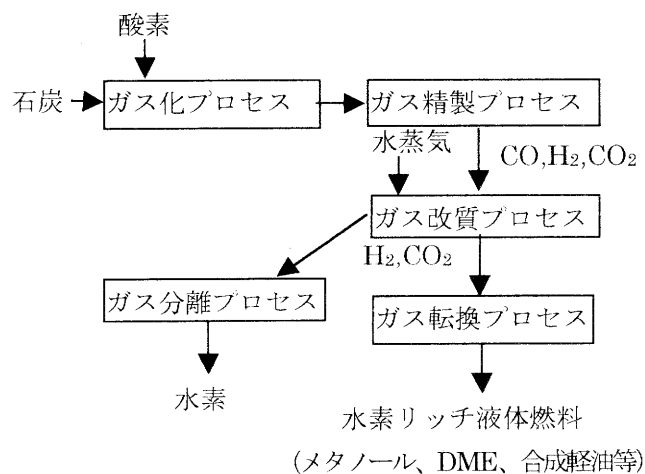


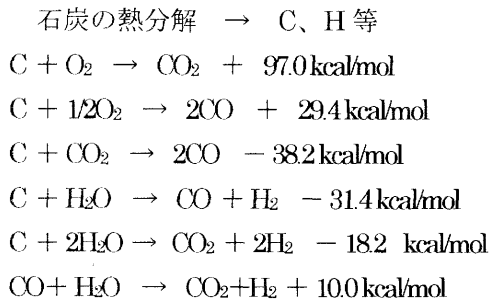
図 3. 石炭からの水素製造フロー

4. 石炭のガス化プロセス

石炭から水素を生成させる方法としては、工業的に行われているのは、ガス化である。

ガス化炉では、高温により石炭の熱分解 (大きな石炭分子が小さな分子に転換する) が行われ、炭素に酸素、水蒸気が反応して、ガス化される。ガス化の基本反応は、以下の通りである。一般的にガス化

の温度が低い場合（800～900℃以下）の場合には、タール分の発生が多くなるが、高温ガス化（千数百℃以上）でガス化する場合には、最終的な可燃成分として、CO、H₂と若干のCH₄が生成される。以下に主なガス化反応を示す。



石炭ガス化炉では、上述の反応により CO と H₂ が主成分のガスが生成され、石炭中の灰分は、固形物として除去される。また、プロセスにより一部の未燃炭素は、系外へ抜き出される。生成した石炭ガス組成の一例を表 4 に示す。

表 4. 石炭ガス化ガスの主要組成例

	酸素吹きガス化
H ₂ (%)	30
CO (%)	40
CO ₂ (%)	10
N ₂ (%)	7
H ₂ O (%)	12
発熱量 (kcal/m ³ N)	2,100

石炭のガス化技術は、近年では石炭ガス化複合発電 (Integrated coal Gasification Combined Cycle) 用として、石炭処理量 2,000 トン/日規模の大規模なガス化設備が世界各国で設置されるなど、次第に成熟してきている技術である。また、日本でも、電力会社で設立した (株) クリーンコールパワー研究所により、出力 25 万 kW 級の発電設備 (ガス化炉石炭処理量 1,700 t/日) の開発が進められている。

5. ガス精製プロセス

生成ガス中には、硫黄化合物である H₂S、COS、窒素化合物である NH₃、その他にも微量成分として HCl 等の物質が混在している。また、チャー回収装置

をすり抜けた未反応の炭素(チャー)や石炭灰の微粒子もガス中に混入している。これらのガス中に含まれる硫黄化合物、微量成分、石炭灰の微粒子等は、後流機器に悪影響を及ぼすため、影響のない程度までのガス精製が必要となる。

ガス精製装置には大きく分けて、湿式ガス精製と乾式ガス精製の 2 種類がある。乾式ガス精製は文字どおりガス化炉から高温で出てきた石炭ガスを高温 (400～500℃) のまま精製するもので、顕熱損失が少ないため高効率を志向したものと見えるが現状では、技術開発段階レベルにある。また、湿式ガス精製は水洗塔、COS 転換器等を設置し、ガス中微量成分などの精密除去が可能であり、後続機器への影響も少なく、IGCC 用のガス精製設備に採用されているほか、天然ガスの精製にも用いられる等工業的には成熟した技術である。湿式ガス精製の主管系統の機器構成は、水洗塔、COS 転換器、H₂S 吸収装置よりなり、各機器の役割は、水洗塔で微量成分、ダスト及び NH₃ の除去を行い、COS 転換器でガス中の COS を H₂S に転換し、H₂S 吸収装置で H₂S を吸収するものである。

6. ガス改質プロセス

石炭ガスと改質天然ガスは、ほぼ同様の組成成分を持つが、石炭ガスの方は、H₂/CO 比が低くなる。このため、石炭ガスをそのまま転換プロセス (DME 合成、フィッシャートロブシュ合成等) の原料とすると収率が低下する。これを避ける方法としては、シフト反応による触媒改質反応炉によりある程度 H₂/CO 比に調整することができる。図 4 は、シフト反応による石炭ガス組成の変化を示す。

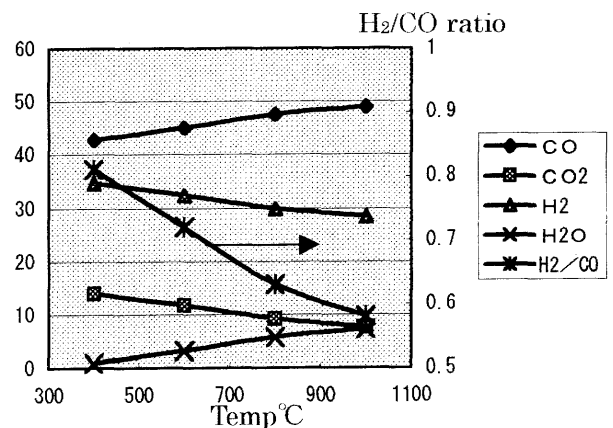


図 4. シフト反応による石炭ガス組成の変化例

7. エネルギー効率と経済性

前述のように石炭から合成する水素系燃料は、石炭のガス化、ガス精製プロセスが必要なため、所要エネルギー及び所要設備が多くなる。試算例として、石炭からの年産 100 万トン規模の GTL 製造を天然ガスからの GTL と比較すると表 5 の様になり、エネルギー効率、経済性共に現状では劣る結果となる。しかしながら、将来的な原料価格の変動、技術革新による設備費の低減等を考慮すると、石炭からの GTL 製造が経済性ベースで実現する可能性が無いとはいえない。

表 5. 石炭/天然ガスの GTL 比較

原料	天然ガス	天然ガス	石炭
原料価格 (想定値)	1 ドル/ MMBTU	2 ドル/ MMBTU	8 ドル/トン
エネルギー 効率	63%	同左	57%
価格比	ベース	約 3 割増加	約 3 割増加

8. 終わりに

資源量の観点から、石炭には、他の化石燃料と比較しても遜色無い水素エネルギーが含まれている。また、石炭をガス化、精製することにより、燃料電池等に使用可能な実用燃料への転換も技術的には可能と考えられる。しかしながら、現時点では、天然ガス等からの水素系燃料と比較すると、ガス化、ガス精製での設備点数が多いため、エネルギー効率及び経済性の面で必ずしも優位にあるとはいえない。石炭からの水素製造は、今後の転換プロセスの技術開発及びエネルギー価格動向により位置づけが定まってくると考えられる。