

## **CCS IN THE EUROPEAN UNION – MOTIVATION, STRATEGY AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT**

**Klaus. R.G. Hein  
University Stuttgart  
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart, Germany**

### **ABSTRACT**

The use of natural energy sources and the subsequent conversion to secondary forms of energy are a crucial base for the development of our society with its continuous change of requirements which are predominantly due to an increase in population and prosperity as well as the broadening of the needs in our modern life. Consequently the consumption of primary energy resources rose drastically worldwide during the last 5 decades, in particular, in the industrialized regions such as the European Union (EU), comprising today of 27 member states.

Historically the predominant primary energy sources in the EU were and still are – apart from the increasing usage of natural gas – black and brown coals which are predominantly used in industry and, in particular, in power stations for electricity generation under stringent regulations for environment protection. utilization mode in many European member states.

A new challenge arose from the worldwide discussion about the emission of i.a. carbon dioxide and its influence on the global climate which is related to the combustion of carbon containing fuels, predominantly from fossil origin. In particular, the Kyoto protocol concerning CO<sub>2</sub>-abatement and the subsequent commitments of the European Union have initiated extensive research and development efforts in Europe for efficiency improvements of large scale fuel conversion processes as well as the capture and storage of CO<sub>2</sub>. As a consequent continuation of the development of high efficient and low emitting processes various alternatives are progressing, some of which reached the demonstration scale already whilst others are still in their early stages towards the expected economic application. Also, apart from nuclear power the renewable energy sources and the s.c. “CO<sub>2</sub>-neutral” fuels such as biomass and organic wastes are considered to play a growing role in a future primary energy mix. In fact, strategies in many European partner countries are strongly promoting the utilisation of such resources as addition to or as part-replacement of fossil fuels and their derivatives.

In line with the above tendencies the energy policy of the European Union is particularly devoted to “adapting the current fossil-fuel based energy system into a more sustainable one, less dependent of imported fuels, based on a diverse mix of energy sources and carriers, with particular attention being paid to lower and non-CO<sub>2</sub> emitting energy technologies, combined with enhanced energy efficiency and conservation, to address the pressing challenges of security of supply and climate change, whilst increasing the competitiveness of Europe’s industries”.

The paper start with summarizing the development of the demand and supply of energy in Europe. After an outline of the strategic considerations and the political intentions of the European Union the presentation will provide an overview of the present European situation in fuel conversion and the consequences related to the greenhouse issue. Special attention will be given to recent advances in power station technology, followed by highlights of corresponding ongoing research and development activities as well as a status revue of the first large scale applications.

### **GROWTH AND STATUS OF THE EUROPEAN UNION**

The European Union (EU) is a multinational and intergovernmental union, established in 1992 by the Treaty of Maastricht, The Netherlands, with the intention to promote the economical and political integration of the member states. The present union is the successor of the s.c. Common Market, the European Economic Community (EEC), founded in 1957 as a supranational association with the purpose of enhancing the economic cooperation of the first 6 members Belgium, The Netherlands, Luxembourg, France, Italy and West Germany. In the following years this community became enlarged by new partners - Denmark, Ireland and Great Britain in 1973, Greece in 1981, Portugal and Spain in 1986 - forming the first EU of 12 member states in 1993. 10 more partners gained accession to

the union in 2004 (Cyprus, Czechia, Estonia, Hungary, Latvia, Lithuania, Malta, Poland, Slovakia, Slovenia) followed by Bulgaria and Romania in 2007 which brought the total present number of member states to 27. The EU represents a single market with no internal barriers, a common trade policy and an own currency adopted so far by already half of its members. Despite of still very strong and historically based gradients in industrial development and economy, in particular between the early partner countries in Western Europe and the more recent new member states of Centre and Eastern Europe, the economy in the European Union has grown steadily over the last decade, resulting in a total GDP increase of almost 48% since 1996. Thus, the EU has developed up to today into one of the largest economical and political units in the world. In fact, selected statistical data for comparable industrial areas (USA, Canada, Japan, Australia, Table 1) show that the EU on an area of less than half of the area of the USA with 60% more inhabitants – resulting in a 4 times higher population density – has presently a Gross Domestic Product (GDP) of the same order of magnitude as the United States. The lower specific productivity per inhabitant in the EU is related to the above briefly mentioned differences between member states; productivity data of several partner countries in Western Europe are comparable to those of the USA and of the other industrialized countries.

**Table 1: Comparative Statistics; Population and Production (data 2004)**

| Country  | EU    | USA   | Canada | Japan | Australia |
|--|-------|-------|--------|-------|-----------|
| Population; 10 <sup>6</sup> inhabitants                  | 492.9 | 301.0 | 32.6   | 128.2 | 20.4      |
| Area, 10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup>                    | 4.24  | 9.63  | 9.94   | 0.38  | 7.69      |
| Population density; inhabitants per km <sup>2</sup>      | 113   | 31    | 3      | 339   | 3         |
| Gross national product, GDP; 10 <sup>12</sup> ; US \$ *) | 12.82 | 11.68 | 0.97   | 4.67  | 0.66      |
| Productivity; 10 <sup>3</sup> US \$ GDP per capita       | 26.0  | 38.9  | 29.8   | 36.7  | 35.0      |
| SpecificEnergy Consumption; toe per capita               | 3.66  | 7.96  | 9.46   | 4.04  | 5.98      |

\*) at current prices and exchange rates

Source: Statistisches Bundesamt, Statistical Yearbook 2006 [1]

In line with the economic growth in the EU, the expected rise in gross energy consumption during the last decade was with 12,1% comparatively low which – at a marginal population increase of about 2.3% – resulted in a reduction of the energy intensity (in toe per 1000 US \$ GDP) of more than 11% [2]. This positive tendency is due to both savings in direct use of primary energy sources and an increasing application of more efficient energy conversion processes and, thus, the specific consumption per inhabitant is – in comparison with similarly advanced regions of the world – much lower, e.g. less than half of that of the USA.

In more detail, the gross inland consumption of energy in the EU of about  $1.8 \cdot 10^9$  toe per year (27 member states; data 2004, [2]) is with more than 77% essentially based on fossil fuels (37.3% oil, 23.9% natural gas, 17.9% solid fuels) with only 14.6% nuclear energy and 6.3% renewable sources. Furthermore noteworthy is – as in most industrialized regions of the world – the remarkable move towards the conversion of primary energy into electricity as the most versatile form of usable energy. Between 1994 and 2004 the electricity generation in the EU increased by about 23.5% which is much in excess of the rise of the total energy consumption of 12.1% during the same period. The fastest growth in generation is reported from wind turbines and – to a much lesser extend – from biomass fired plants, however, with presently a share of only 1.8% and 2.1% respectively. In total, apart from 31.0% nuclear and 10.6% hydro power, the electricity production in the EU is based on the fossil fuels coal (including lignites) with 29.5%, natural gas with 18.9% and a remaining 4.5% on oil [2].

The above stated energy consumption is in contrast with an own total production of primary energy carriers which – after a decrease since 1996 by 5.2% – came in 2004 close to  $0.9 \cdot 10^9$  toe per year, of which Great Britain, Germany and France contributing almost 54%. These data underline the fact that the in-house production in the EU is not only highly diverse and regionally distributed in resources as well as output but also insufficient to cover the demand. Therefore, there is a dependence on energy imports of about 50% on average which strongly varies from 4% to more than 80% between the various member states.

## NEW CHALLENGES AND TARGETS FOR EUROPE

A new challenge to power station technology arose due to the worldwide discussion about the emission of i.a. carbon dioxide and its influence on the global warming ("green house effect") which is related to the combustion of carbon containing fuels, predominantly of fossil origin. Following the directives based on the Kyoto agreements for the reduction of green house gases the European Union promised a reduction of 8 % between 2008 and 2012

compared to 1990. Consequently, an increase of the utilisation of renewable energy sources is one of the targets of the European energy strategy which should result in a 6 – 12 % share of the primary energy supply and 14 – 22 % in electricity generation by 2010.

In order to comply with these ambitious goals Europe is challenged to address the following interrelated and to some extent controversial issues:

- Sustainable energy supply
- Reduction of adverse effects on the local/regional environment
- Minimisation of hazardous influence on the global climate
- Preservation of primary energy resources
- Production of electricity at competitive cost level

For the performance of the activities policy measures were developed such as a recently distributed Green Paper on “A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy” [3] which elaborates the priority areas for possible common actions and comes up with concrete proposals for immediate motions.

Furthermore, instruments for the support of technology advancement programmes through research, development and demonstration for several years’ duration, the “Framework Programmes” (FP) are essential parts of the EU strategy. During the previous 5<sup>th</sup> FP (1998-2002) [4] already several multi-country, multi-partner projects on CO<sub>2</sub>-sequestration and storage monitoring of in total 32 million Euro were partly financed by the European Commission, followed during the last 6<sup>th</sup> FP (2002-2006)[5] by more specific and still ongoing projects on advanced CO<sub>2</sub>-separation techniques for fossil fuel plants, subsequent large scale CO<sub>2</sub>-storage and co-ordination activities of EU-member states programmes as well as EU-involvement in international cooperation, e.g. contributing to the Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF).

The presently ongoing 7<sup>th</sup> FP [6] is based upon the key considerations that

- fossil fuel will continue to play a major role in the power generation mix in the following decades
- environment protection requires a drastic reduction of CO<sub>2</sub> emissions
- there will be a large demand for new generation capacity.

In order to path the future in Europe in continuation of the previous programmes and in line with the above challenges, the priorities in this new research programme of the European Commission to support research, development and demonstration are the following:

- energy savings
- energy conversion efficiency
- renewables in heating/cooling/electricity production
- hydrogen/fuel cell technology
- 

and in particular:

- clean coal technologies
- CO<sub>2</sub> capture and storage technologies for zero emission power generation

With the two last topics it is intended to improve plant efficiency, reliability and economy through development and demonstration of clean coal technologies as well as drastically reduce the environmental impact of fossil fuel use by aiming at near zero emission power plants based on additional CO<sub>2</sub> capture and storage technologies.

Numerous industrial activities either in planning or already under construction are presently on the way in Europe and first large scale demonstration plants are expected to start operation from this year onwards.

Furthermore, most recently the European Union drastically tightened their already ambitious goals for reducing the influences on global climate by setting a target towards limiting the global temperature increase to a maximum of 2°C. For this, the strategic objective is a 20% reduction of green house gases by 2020 (and even 50% by 2050, provided that other regions of the world will follow) compared to 1990 by an “Energy Efficiency Action Plan” for the 3 sectors transport, buildings and electricity/heat generation. More precise, a mix of all primary energy sources is intended including 15% nuclear power (1/3 of electricity) and 20% renewables (with 10% bio fuels for transport).

## **ONGOING ACTIONS**

Within the carbon free options hydropower as one of the regenerative energy sources is already extensively used and a substantial increase of its about 5 % share in Europe is unlikely. Other regenerative sources such as wind and solar energy are favoured by politics and by some part of our society and therefore, their utilisation is at present heavily subsidized in many European countries. However, area requirements, energy density, local availability of the natural energy source, local net considerations and investment costs may restrict their application. Still a limited contribution to the overall electricity supply will be provided by these sources even in regions in Europe with less beneficial natural boundary conditions.

Another alternative is the use of s.c. "CO<sub>2</sub>-neutral" fuels like biomass (both grown or as by-products from various industrial processes). Europe is targeting for an increased utilisation of such sources from 3 % in 1995 to almost 9 % share in the energy market by 2010. The potential of such fuels as a part-replacement is remarkable considering the regional availability of such fuels, the positive effect of preservation of primary energy resources and of alleviating disposal problems, and the attraction of co-utilisation in existing fossil fuel fired plants as a technically feasible and cost-effective solution. Based upon the positive experience from industrial demonstration projects ongoing in the EU and numerous other activities the additional use of biomass seems promising although comparatively limited in total capacity.

Therefore, the security of supply requires the energy efficiency of conventional fuel conversion based on fossil fuels to be raised considerably. For this reason and as a continuation of the improvement of high efficient and low emitting fuel conversion processes various alternatives are under development, some of which reached the demonstration scale already whilst others are still in their early stages towards the envisaged economic application. One of the major ongoing research and development issues in Europe is dealing with the further improvement of the efficiency of the conventional supercritical power station concept with pulverized coal. This concept is entirely devoted to improving the fuel conversion process by testing advanced materials. At present materials are under investigation for 700 °C application at 350 bar in a 500 MW<sub>e</sub> boiler for the design of a next generation demonstration power station to be commissioned at about 2015 [7]. This process is aiming at overall efficiencies of above 47 % and, thus, a considerable reduction of the specific CO<sub>2</sub>-emission in comparison to the state of the art. Because the present emission control technology complies with the European standards no further development of flue gas treatment is required at this stage.

In addition, new concepts towards a Zero Emission Power Plant (ZEP) were started in recent years in line with the Carbon Capture and Storage (CCS) initiative of the European Commission [8]. One of these concepts is the Post Combustion alternative in which the CO<sub>2</sub> is separated from the flue gas by scrubbing with e.g. amines or other chemicals. This well known technique is supposed to be economically applicable for power plants with already high efficiency and even for retrofit purposes at such plants. As this low temperature gas treatment needs an additional energy consuming regeneration of the sorbents research is ongoing on this process and on alternative separation techniques in order to reduce the efficiency penalty as well as costs. However, as an interesting technology this process was investigated within an EU-supported research project and is at present considered to be tested on large scale by various utilities in Europe.

A second alternative is the Oxyfuel process in which the fuel is burnt with O<sub>2</sub> resulting in an almost N<sub>2</sub>-free flue gas from which the CO<sub>2</sub> can be separated from the H<sub>2</sub>O by condensation. After several years of intense research on laboratory and pilot scale in Europe the first 30 MW<sub>th</sub> prototype is presently in the phase of start-up in Germany. For this process an air separation prior to combustion is required. For this the well known cryogenic process is available at present and research is ongoing to reduce the costs of this low temperature gas separation by process improvements. As the Oxyfuel process includes a flue gas recirculation to the combustion chamber for temperature control an alternative O<sub>2</sub>-supply via a high temperature membranes is under investigation. This concept promises a considerable reduction of the efficiency penalty of the cryogenic air separation but requires a cleaning of the recirculated flue gas at temperatures of about 800 °C prior to the membrane. Such hot gas cleaning systems using ceramic barrier filters are presently under tests.

The third clean coal technology is essentially based on the above described IGCC process with O<sub>2</sub> input to the gasifier and a shift of the CO in the process gas to CO<sub>2</sub>, hence resulting in a gas containing predominantly H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>. As this H<sub>2</sub> would be then available for either external use e.g. in high temperature fuel cells, or as fuel for a (future) H<sub>2</sub>-gas turbine within the IGCC concept this process is named Precombustion technology. In order to separate H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> low temperature process are available with the disadvantage of cooling the process gas and, thus, an energy loss prior to the turbine for which reheating of the gas is required. As alternative solution high temperature separation is desirable for which ceramic and polymeric membranes are presently also under investigation.

Also it should be mentioned that the use of other feedstock to the gasifier in an IGCC process such as materials of biogenic origin would require additional gas cleaning steps for the removal of e.g. tar, alkali species and elevated

chlorine and sulphur compounds in order to provide gas qualities for turbines or high temperature fuel cells. Although this can be dealt with by conventional methods hot gas cleaning at temperatures above 450 °C is of advantage in terms of overall process efficiency and specific CO<sub>2</sub>-production. Therefore, the membrane separation technique at elevated temperature including catalysis – separate or incorporated – is under investigation in Europe on laboratory scale with first promising results.

With regard to large scale application the new IGCC process with CO<sub>2</sub> separation, a first demonstration plant with a capacity of 450 MW<sub>e</sub> is in planning in Germany and is expected to be commissioned in 2014. This project will produce CO<sub>2</sub> for storage, the separation will be realized by well experienced low temperature technique.

All the above activities with regard to CO<sub>2</sub> capture require CO<sub>2</sub> transport and final storage. Both are existing technologies and well experienced in particular in the gas and oil industry. Well known examples of CO<sub>2</sub> storage are the projects of raw natural gas separation at Sleipner since 1996, the most recent Snohvit field both in Norway and at In Salah, Algeria since 2004 as well as at Weyburn in Canada for enhanced oil recovery.

However, it is meanwhile well understood that the presently stored CO<sub>2</sub> volumes of the above projects are small in comparison with the expected volumes to be removed from power plants. Therefore, a considerably upscaling in transportation and storage is required. However, most critical is the definition of storage criteria, the selection of appropriate underground on- and off-shore storage sites and the preparation of the legal framework. All these are activities of high priority which are presently carried out in Europe at many institutions and member states with considerable support from local governments and from the European Union.

## REFERENCES

- [1] Statistisches Jahrbuch 2006, Statistisches Bundesamt, <http://www.eds-destatis.de>
- [2] Eurostat Yearbook 2006-2007, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>
- [3] Commission of the European Communities, Green Paper “A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy”, Brussels, 8.3.2006
- [4] 5<sup>th</sup> Framework Programme, European Commission <http://cordis.europa.eu/fp5>
- [5] 6<sup>th</sup> Framework Programme, European Commission <http://cordis.europa.eu/fp6>
- [6] 7<sup>th</sup> Framework Programme, European Commission <http://cordis.europa.eu/fp7>
- [7] F. Bauer e. al, Role of 700 °C Technology for the Carbon-low Power Supply, VGB PowerTech 4/2008, pp 30-32
- [8] J. Lambertz, Efficient Power Generation in Coal- and Gas-fired Power Plants, VGB PowerTech 1/2 2005, pp 42-45



## EUにおけるCCSに対する戦略及び技術開発動向

Klaus. R. G. Hein  
University Stuttgart (シュトゥットガルト大学)  
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart, Germany

### 要旨

自然エネルギーの使用と二次エネルギー形態への転換は、私たちの社会の発展にとって極めて重要なベースである。主として人口増加と繁栄並びに近代生活のニーズの広がりによって、社会の必要条件は絶えず変化している。その結果、一次エネルギー資源の消費量はこの50年間世界中で急激に増えている。特に、今では27カ国が加盟する欧州連合（EU）のような工業化のすすんだ地域では顕著である。

歴史的にEU内の主な一次エネルギー源は、使用量が伸びている天然ガスを別とすれば、黒炭と褐炭であり、現在でもそれには変わりはない。黒炭や褐炭の大部分は産業分野で使用されている。特に発電所では、ヨーロッパの多くの加盟国で環境保護や利用形態に対する厳しい規制のもと発電用に大量に使用されている。

地球温暖化ガスの排出、とりわけ二酸化炭素の排出とその地球気候への影響に関する世界的な議論から、新たな課題が生じている。これは、燃料、主には化石起源の燃料を含む炭素の燃焼に関連した問題である。特に、CO<sub>2</sub>削減に関する京都議定書とそれに追随したEUの取り組みにより、ヨーロッパでは大規模燃料変換プロセスの効率改善のほか、CO<sub>2</sub>の分離、回収、貯留に向けた広範な研究開発が始まっている。その結果、高効率、低排出プロセスの開発が継続的に行われ、様々な代替技術が発展を続けている。その中には既に実証段階に達したものもあれば、まだ実用的応用を目指した初期段階にあるものもある。また、原子力とは別に、再生可能エネルギー源やバイオマスや有機廃棄物のような、まさに“CO<sub>2</sub>ニュートラル”な燃料が将来の一次エネルギー・ミックスにおいて大きな役割を担っていくとみられる。実際、ヨーロッパの多くの加盟国では、このような資源を化石燃料やその派生物に加えて、あるいは部分的な代替燃料として利用することが各種戦略によって強力に推進されている。

上述の傾向に沿って、欧州連合のエネルギー政策は特に次の方向性をとっている。「現在の化石燃料方式のエネルギー・システムをより持続可能なものに適応させ、輸入燃料への依存を減らし多様なエネルギー源、エネルギー媒体の組み合わせで低CO<sub>2</sub>排出及びCO<sub>2</sub>排出ゼロのエネルギー技術に特に注意を払っていく。この新たなエネルギー・ミックスをエネルギー効率改善や高度エネルギー変換技術と組み合わせ、供給確保並びに気候変動の差し迫る課題に取り組みながら、ヨーロッパの産業競争力を高めていく」。

本論文は、ヨーロッパのエネルギー需給の展開の概説から始める。欧州連合の戦略ポイントや政策意図の概要を述べた後、ヨーロッパの燃料変換の現状及び温室効果問題の成り行きについて概観を示す。近年の発電技術の進歩については特に注意して取り上げ、その後対応する進行中の研究開発活動に焦点を当てるとともに初の大規模利用の現状をみていく。

### 欧州連合の成長と現状

欧州連合（EU）は多国間、政府間の連合体であり、加盟国の経済的、政治的統一の推進を目指したマーストリヒト条約（オランダのマーストリヒトで締結）によって1992年に設立された。現EUは、かつての共同市場である欧州経済共同体（EEC）を引き継いでいる。EECは、ベルギー、オランダ、ルクセンブルグ、フランス、イタリア、西ドイツの当初の6カ国の経済協力をすすめる目的で1957年に超国家的な連合として設立されたものだ。その後この共同体は次々と加盟国を増やして拡大した。1973年にデンマーク、アイルランド、英国、1981年にはギリシャ、1986年にはポルトガルとスペインが加わり、1993年のEU発足当初の12カ国を形成するに至っている。2004年には更に10カ国（キプロス、チェコ、エストニア、ハンガリー、ラトビア、リトアニア、マルタ、ポーランド、スロバキア、スロベニ

ア) が EU に登録し、2007 年にはブルガリアとルーマニアが続いた。これで現在の総加盟国数である 27 カ国になっている。

EU は内部障壁のない単一市場、共通の貿易政策、既に加盟国の半数が採択している独自通貨を体現している。産業発展や経済面では、特に当初の加盟国である西ヨーロッパと後に加盟した中央ヨーロッパや東ヨーロッパとの間には依然として画然たる歴史的な格差が存在するものの、欧州連合内の経済はこの 10 年間で着実に成長しており、1996 年からの総 GDP 成長率は 48% 近くにはのぼっている。このように、EU は今日までの発展によって世界最大の経済連合、政治連合に成長した。実際、工業先進地域（米国、カナダ、日本、オーストラリア - 表 1）を比較した確かな統計データによれば、EU は米国と比べて面積は半分以下、人口は 60% 多いが（その結果、人口密度は 4 倍以上）、国内総生産（GDP）は米国と同じ桁数を示している。EU の人口当りの特定生産性は他地域より低い、これはさきほど少し触れた加盟国間の格差によるものである。西ヨーロッパには、米国や他の工業先進国に匹敵する生産性データを示す加盟国がいくつもある。

表 1：比較統計データ；人口と生産力（2004 年データ）

| 国名                          | EU    | 米国    | カナダ  | 日本    | オーストラリア |
|-----------------------------|-------|-------|------|-------|---------|
| 人口（百万人）                     | 492.9 | 301.0 | 32.6 | 128.2 | 20.4    |
| 面積（100 万 km <sup>2</sup> ）  | 4.24  | 9.63  | 9.94 | 0.38  | 7.69    |
| 人口密度（km <sup>2</sup> 当りの人口） | 113   | 31    | 3    | 339   | 3       |
| 国内総生産（GDP）（US \$10 兆ドル）*    | 12.82 | 11.68 | 0.97 | 4.67  | 0.66    |
| 生産性（GDP US \$ 10,000 /人）    | 26.0  | 38.9  | 29.8 | 36.7  | 35.0    |
| 比エネルギー消費量（TOE/人）            | 3.66  | 7.96  | 9.46 | 4.04  | 5.98    |

\*) 現時点の価格と為替レートによる

出典：Statistisches Bundesamt, Statistical Yearbook 2006 [1]

EU の経済成長率と直結する形で、この 10 年の総エネルギー消費量の推定伸び率は 12.1% と比較的 low、周辺人口の増加が約 2.3% で結果的にエネルギー強度（TOE/GDP US\$ 1,000）が 11% 以上低下した[2]。このプラスの傾向は一次エネルギー源の直接的な省エネとより効率的なエネルギー変換プロセスの普及の双方によるものであり、このため人口当りの比エネルギー消費量は世界の同じような先進地域と比較して、例えば米国の半分以下というようになりかなり低い数字である。

更に詳しく見れば、EU 域内の総エネルギー消費量は年間約 18 億 TOE であるが（27 加盟国、2004 年データによる[2]）、77% 以上は基本的に化石燃料によるもので（石油 37.3%、天然ガス 23.9%、固体燃料 17.9%）、原子力は 14.6%、再生可能エネルギー源は 6.3% にすぎない。この他注意すべきことは、世界の最も工業化された地域にみられるように、使用可能なエネルギーの最も万能な形態である電気に一次エネルギーを変換しようとする顕著な動きがみられることである。1994 年から 2004 年までの EU の発電量は約 23.5% 増加したが、これは同期間の総エネルギー消費量の伸び 12.1% よりはるかに多い。発電量が最も急速に伸びたのは風車によるものと報告されている。それより伸び率はかなり小さいがバイオマス燃料を使用した発電所でも発電量が伸びている。しかし、現時点で総発電量に占める割合は風車が 1.8%、バイオマスが 2.1% とわずかである。全体的には、31.0% の原子力、10.6% の水力を別にすれば、EU 域内の発電は化石燃料に頼っており、石炭（亜炭を含む）が 29.5%、天然ガスが 18.9%、石油が残りの 4.5% を占めている[2]。

上記のエネルギー消費量は一次エネルギー媒体の域内総生産量とは対照的である。1996 年以降、域内総生産量は 5.2% 減少しており、2004 年には年間 9 億 TOE 程度にまでなった。この内、英国、ドイツ、フランスが 54% 近くを占めている。このデータは、EU 域内の生産が非常に多様で資源とともに発電量も地域的に分布しているだけでなく、需要を満たすには不十分であるという事実も物語っている。このため、輸入エネルギーへの依存率は平均で約 50% だが、加盟国間で 4% から 80% 以上までかなりの開きがある。

## ヨーロッパの新たな課題と目標

排出量、とりわけ二酸化炭素の排出量とその地球温暖化への影響（「温室効果」）に関する世界中の議論により、発電技術に関する新たな課題が持ち上がっている。これは、燃料の中でも主として化石起源のものを含む炭素の燃焼に関連した問題である。温室効果ガス削減に対する京都合意に基づいた指令により、欧州連合は2008年から2012年までに1990年比で8%削減すると約束した。その結果、再生可能エネルギー源の利用を伸ばし、2010年までに一次エネルギー供給に占める割合を6~12%に、発電に占める割合を14~22%に引き上げるという欧州エネルギー戦略の目標の1つとなっている。

この意欲的な目標を達成するため、ヨーロッパは以下の相互に関連した、またある程度議論の余地がある問題への取り組みが課題となっている。

- 持続可能なエネルギー供給
- 地域環境への悪影響の低減
- 地球気候への有害な影響の最小化
- 一次エネルギー資源の保護
- 競争力のあるコストでの発電

活動の実施に向けて、様々な政策が打ち立てられている。例えば最近刊行されたグリーン・ペーパー「持続可能で競争力のある安定したエネルギーを確保する欧州戦略」（“A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy” [3]）では、共通対策が可能な優先地域を綿密に選定し、素早い行動を具体的に提案している。

更に、数年にわたる研究、開発、実証を通じた技術進展プログラムをサポートする道具として、「枠組み計画」（“Framework Programmes” (FP)）がEU戦略の重要な部分となっている。前回の第5回FP（1998~2002）[4]では、既に全部で3200万ユーロにのぼるCO<sub>2</sub>隔離・貯蔵モニタリングに関する幾つかの多国間、多企業間プロジェクトが欧州委員会から部分的な補助を受けている。第6回FP（2002~2006）[5]では、化石燃料プラント用高度CO<sub>2</sub>隔離技術に関するより具体的なプロジェクトが続き（現在も進行中）、その後大規模CO<sub>2</sub>貯留調整活動がEU加盟国プログラムやEU関与の国際協力として実施され、炭素隔離リーダーシップフォーラム（CSLF）に貢献するなどしている。

現在行われている第7回FP [6]は、以下の主な見地に基づいている。

- 化石燃料は今後数十年間は引き続き発電ミックスで大きな役割を果たし続ける。
- 環境保護には徹底的なCO<sub>2</sub>排出削減が必要である。
- 新方式の発電には大きな需要が生まれる。

以前のプログラムを継続し上記の課題とあわせてヨーロッパの将来を歩むためには、研究、開発、実証をサポートする欧州委員会のこの新たな研究プログラムで優先事項となるのは以下の内容である。

- 省エネ
- エネルギー変換効率
- 加熱/冷却/発電における再生可能エネルギー
- 水素/燃料電池技術
- 

特に：

- クリーン・コール・テクノロジー
- ゼロエミッション発電のためのCO<sub>2</sub>隔離、回収、貯留技術

最後の2つの項目は、まず1つ目ではクリーン・コール・テクノロジーの開発実証によって発電所の効率、信頼性、経済性を改善することを目指している。2つ目は、CO<sub>2</sub>隔離、回収、貯留技術を追加したゼロエミッション発電所を目指すことで、化石燃料使用の環境への影響を思い切って減らすためのものである。

これに関連して、計画中あるいは既に工事に入っている数々の産業活動が現在ヨーロッパで進行しており、初の大規模実証プラントが今年以降に運転を開始するとみられている。

この他ごく最近では、欧州連合が気候への影響を低減する上で既に意欲的だった目標の更なる締め付けを行った。地球の気温上昇を最大 2°C以下に抑えるという目標を設定したのだ。このための戦略的目標は、輸送、ビル、発電/発熱の3部門を対象としたエネルギー効率化行動計画(Energy Efficiency Action Plan)により温室効果ガスを2020年までに1990年比で20%削減する(世界の他の地域が追従すれば2050年までに50%削減をも行う)というものである。より正確には、全ての一次エネルギー源をあわせたエネルギー・ミックスを目指しており、これには15%の原子力(電気の1/3)、20%の再生可能エネルギー(輸送用に10%のバイオ燃料)も含まれる。

## 進行中の対策

カーボン・フリー・オプションの中で再生可能エネルギー源の1つである水力は既に広範に利用されており、ヨーロッパで約5%のシェアが大幅に拡大するとは考えにくい。他の再生可能エネルギー源、例えば風力や太陽エネルギーなどが政策や社会の一部から優遇されているため、多くのヨーロッパ諸国で現在重点的な補助を受けている。しかし、場所的な条件、エネルギー密度、自然エネルギー源の地域性、地域ネット条件、投資コストによってその利用が制限される場合もある。それでもこれらのエネルギー源は、ヨーロッパで自然環境条件に恵まれない地域でも全体的な電気供給にある程度の貢献をするだろう。

別の代替エネルギーとして、バイオマスのようなまさに“CO<sub>2</sub>ニュートラル”な燃料(天然のものも各種産業プロセスの副産物も)の使用である。ヨーロッパはこれらのエネルギー源の利用を1995年のエネルギー市場に占める割合である3%から2010年までにはほぼ9%に引き上げることを目指している。これらの燃料の地域性、一次エネルギー資源保護や処分問題の軽減のプラス効果、更には既存の化石燃料燃焼プラントで技術的に実現可能で経済的なソリューションとして共用できる魅力を考えると、将来的に一部代替燃料としてこれらの燃料を利用できる可能性は非常に大きい。EUで進行中の産業実証プロジェクトによる経験や他の数々の活動から、バイオマスの更なる利用は全体的なキャパシティは比較的限られているものの将来有望であるとみられる。

従って、供給の確保を図るには、化石燃料による従来の燃料変換エネルギー効率を大幅に引き上げる必要がある。この理由から、また高効率低排出燃料変換プロセスの改善の継続として、様々な代替技術の開発が進められている。その中には既に実証段階に達したのものもあれば、まだ実用的応用を想定した初期段階にあるものもある。

ヨーロッパで進行中の主な研究開発の1つに、従来式の微粉炭による超臨界発電効率の更なる改善を扱ったものがある。この発電コンセプトは、もっぱら先端材料の試験によって燃料変換プロセスを改善することに注がれている。現在、2015年ごろに試運転を開始する予定の次世代実証発電所の設計用として、500 MWeボイラーで350 bar、700 °Cで使用する材料の調査研究が行われている[7]。このプロセスは全体効率約47%を目指しており、最新式に比べて特定CO<sub>2</sub>排出量の大幅な削減を狙っている。現在の排出制御技術は欧州規格に準拠しているため、煙道ガス処理技術のさらなる開発はこの段階では必要ない。

この他、欧州委員会のCO<sub>2</sub>隔離、回収、貯留(CCS)イニシアチブに沿って、この数年でゼロエミッション発電所(ZEP)に向けた新たなコンセプトが幾つか立ち上がっている[8]。その1つが、煙道ガスからアミンなどの化学物質でCO<sub>2</sub>を分離する燃焼後分離技術である。この良く知られた技術は、既に高効率の発電所にも、またそのような発電所の改装用にも経済的に適用可能とされている。この低温ガス処理はエネルギーを余分に消費する吸収剤の再生が必要なことから、このプロセスや別の分離技術についても効率低下の解消やコスト削減のための研究がすすめられている。しかし、このプロセスは興味深い技術として、EU支援の研究プロジェクトの中で調査研究が行われ、現在ヨーロッパの企業による大規模試験が検討されている。

2番目の代替技術は酸素燃焼プロセスである。酸素燃焼プロセスは、燃料をO<sub>2</sub>で燃焼させることで煙道ガスにはN<sub>2</sub>がほとんど含まれず、H<sub>2</sub>Oを凝縮させることによりCO<sub>2</sub>を分離することができる。ヨーロッパで実験室規模及びパイロット規模の精力的な研究が数年間にわたって実施され、初の30 MW<sub>th</sub>試作機が現在ドイツで始動段階にある。このプロセスでは、燃焼前に空気の分離が必要である。これには現

時点では既知の深冷分離プロセスを利用できるが、この深冷分離のコストをプロセス改善によって削減する研究が進められている。酸素燃焼プロセスでは煙道ガスを燃焼室に再循環させて温度制御を行うため、高温薄膜による別のO<sub>2</sub>供給技術の調査研究が進行している。このコンセプトは極低温空気分離の効率低下を大幅に抑えるものだが、薄膜の手前で約 800°Cになる再循環煙道ガスの浄化が必要になる。このような高温ガスをセラミックバリアフィルタで浄化するシステムの試験が現在行われている。

3番目のクリーン・コール・テクノロジーは、基本的に上記のIGCCプロセスによるもので、ガス化炉にO<sub>2</sub>を供給しプロセスガス中のCOをCO<sub>2</sub>に転換することでほとんどH<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>しか含まないガスを発生させる技術である。発生したH<sub>2</sub>は高温燃料電池などの外部利用にも、(将来的には)IGCCコンセプトにおけるH<sub>2</sub>ガスタービンで燃料としても利用できることから、このプロセスは燃焼前技術と呼ばれる。H<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>の分離には低温プロセスを利用することができるが、プロセスガスを冷却しなければならない点が不利であり、結局ガスの再加熱が必要になってタービンの手前でエネルギーロスが生じてしまう。これを解決するには高温分離が望ましいが、この目的でセラミック膜と高分子膜の調査研究も現在行われている。

また、IGCCプロセスのガス化炉に生物起源の材料など別の原料を使用した場合は注意が必要である。タール、アルカリ類、多量に含まれる塩素化合物や硫黄化合物を除去するガス浄化工程を追加して、タービンや高温燃料電池で使用できるガス品質を確保する必要があるからだ。これは従来方法で対処できるが、全体的なプロセス効率や特定CO<sub>2</sub>生産量の点では450°C以上の高温ガス浄化が有利である。このため、触媒作用を含む高温での膜分離技術(別工程または一体型)の実験室規模の調査研究がヨーロッパですすすめられており、期待の持てる最初の成果が得られている。

大規模利用に関しては、CO<sub>2</sub>分離を含むIGCCプロセスの初の実証プラント(発電出力450 MW<sub>e</sub>)がドイツで計画中であり、2014年に試運転が行われるとみられる。このプロジェクトでは貯留用のCO<sub>2</sub>を発生させ、経験豊富な低温技術で分離を実現する。

CO<sub>2</sub>分離回収に関わる上記の取り組みのすべてでCO<sub>2</sub>の輸送と最終的な貯留が必要である。両方とも従来技術であり、特にガス・石油産業では経験が蓄積されている。CO<sub>2</sub>貯留の有名な例として、ノルウェーのスライプナーで1996年から、同じくノルウェーのスノービットガス田でも最近、また2004年からアルジェリアのインサラーでも行われている粗天然ガスの分離プロジェクトがある。このほか、カナダのウェーバーンでは石油高次回収プロジェクトが実施されている。

しかし一方で、上記のプロジェクトで現在貯留されているCO<sub>2</sub>量は、発電所から除去すべき推定量と比べればわずかであることもよく分かっている。したがって、輸送と貯留の規模を大幅にアップしなければならない。しかし、最も重要なことは、貯留基準の定義、地下や海底の適切な貯留サイトの選定、法的枠組みの整備である。これらはすべて最優先の作業であり、現在ヨーロッパの多数の機関や加盟国で自治体や欧州連合から少なからぬ補助を得て実施されている。

## 参考文献

- [1] Statistisches Jahrbuch 2006, Statistisches Bundesamt, <http://www.eds-destatis.de>
- [2] Eurostat Yearbook 2006-2007, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>
- [3] Commission of the European Communities,  
Green Paper "A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy",  
Brussels, 8.3.2006
- [4] 5th Framework Programme, European Commission <http://cordis.europa.eu/fp5>
- [5] 6th Framework Programme, European Commission <http://cordis.europa.eu/fp6>
- [6] 7th Framework Programme, European Commission <http://cordis.europa.eu/fp7>
- [7] F. Bauer et al, Role of 700 °C Technology for the Carbon-low Power Supply, VGB PowerTech 4/2008, pp 30-32
- [8] J. Lambertz, Efficient Power Generation in Coal- and Gas-fired Power Plants, VGB PowerTech 1/2 2005, pp 42-45



氏名： Dr Klaus R. G. Hein



Education:

Graduation Chemical Engineering, University Aachen / Germany, 1964

Postgraduate scholarship, Imperial College London / Great Britain, 1964 /65

PhD, University Stuttgart / Germany, 1972

Professional Career:

Research engineer, International Flame Research Foundation, Ijmuiden / The Netherlands, 1966-71

Head Research Department, RWE, Essen / Germany. 1971-92

Professor (part-time) for Combustion / Technology, University Delft / the Netherlands, 1966-2004

Professor and Director, Institute for Process Engineering and Power Plant Technology, University Stuttgart / Germany, 1992-2004

Professor and Acting Director, Institute of Combustion

Technology, University Stuttgart / Germany, 2003-present

Several awards for outstanding scientific / technological Achievements (Europe, China, USA)

Additional functions, i.a.:

Member of many international energy / environment related scientific, industrial bodies Organizations (VGB,GVC,FDBR,IFRF,ASME)

Member of expert delegations from German Government / European Union to USA, Australia, Indonesia, China, Japan

Consultancy /advisory activities to industry (Germany, Australia, USA, Japan, Bulgaria, Spain, Morocco, Ukraine, China)

Organizer / lecturer, international training courses (Europe, USA, China)

Assessor / evaluator / coordinator of research programmes of the European Commission

## Dr Klaus R. G. Hein

学歴：

- ・ アーヘン大学（ドイツ）の化学工学部を卒業（1964年）
- ・ ロンドン大学インペリアルカレッジ（英国）の大学院奨学生（1964～1965年）
- ・ シュトゥットガルト大学（ドイツ）で博士号取得（1972年）

職歴：

- ・ IFRF(International Flame Research Foundation、当時はオランダのアイマンデンに所在)の研究技術者に従事（1966年～1971年）
- ・ RWE（ドイツ、エッセン）で研究開発部主任を務める（1971年～1992年）
- ・ デルフト大学（オランダ）燃焼/技術学科教授（非常勤）（1996年～2004年）
- ・ シュトゥットガルト大学（ドイツ）プロセス工学発電技術学科、教授兼理事（1992年～2004年）
- ・ シュトゥットガルト大学（ドイツ）燃焼技術学科、教授兼理事代行（2003年～現在）
- ・ 優れた科学的/技術的成果に対する数々の賞を受賞（ヨーロッパ、中国、米国）

その他の職務：

- エネルギー/環境関連の多数の国際的な科学団体や産業組織の会員 (VGB、GVC、FDBR、IFRF、ASME)
- ドイツ政府/欧州連合から米国、オーストラリア、インドネシア、中国、日本への専門家派遣メンバー
- 産業界に対するコンサルティング/顧問活動 (ドイツ、オーストラリア、米国、日本、ブルガリア、スペイン、モロッコ、ウクライナ、中国)
- 国際研修コースのオーガナイザー/講師 (ヨーロッパ、米国、中国)
- 欧州委員会の研究プログラムの査定官/評価委員/コーディネーター