

図5-3 システムの発電性能と熱効率

水平に近い分布を示しているのは、電池本体の効率が低下する電流密度の大きな範囲で、サイクル排熱が増大するが、これが改質反応熱として有効に利用されるためである。

以下の項では、基本条件（定格作動点）を図5-3の $I=0.3[A/cm^2]$ に設定し、CO₂分離・濃縮効果の考察を行った。

5.4.2 CO₂分離・濃縮効果—在来熱機関との比較—

本システムでは、基本的に空気極側排出ガス(主としてN₂)と、燃料極側のCO₂は電解質膜で隔離されているが、システムの構成上必要な補助燃焼の際、若干のCO₂が空気系に混入する。燃料極側で分離装置入口ガス(図5-1,F8)中に濃縮されたCO₂の体積濃度 $M(CO_2)_F$ 、および空気極側で煙突から大気に排出されるガス(図5-1,A8)中の濃度 $M(CO_2)_A$ は、表5-1のガス組成から次のようになる。

$$M(CO_2)_F = e/y / \{e/y + 4(1-e)\}$$

$$M(CO_2)_A = \{(x-e) + e \cdot (y-Abs)/y\} / [\{(x-e) + e \cdot (y-Abs)/y\} + 2 \cdot 3.762 \lambda + 2(\lambda - e) + (x-e)] \quad (5-7)$$

図5-4は、いくつかの条件に対する二酸化炭素の体積濃度を在来熱機関の場合と比較したものである。図中、左半分が大気排出ガス中(図5-1,A8)の体積濃度、右半分が分離装置入口(F8)での濃度である。大気放出ガス中の濃度は在来熱機関での6.5% ($\lambda = 1.5$ とした場合の値)に対して、その1/10以下に減少し、空気圧縮比RCが小さいほどこの効果が大きい。さらに、CO₂分離効率Absを1.0と仮定する場合や、排熱回収量が多く補助燃焼を必要としない場合(Hcc=0)では、当然の事ながら $M(CO_2)$ は零となる。一方、分離装置入口の体積濃度は在来機関の排気ガスに比べて約10倍、燃料を水蒸

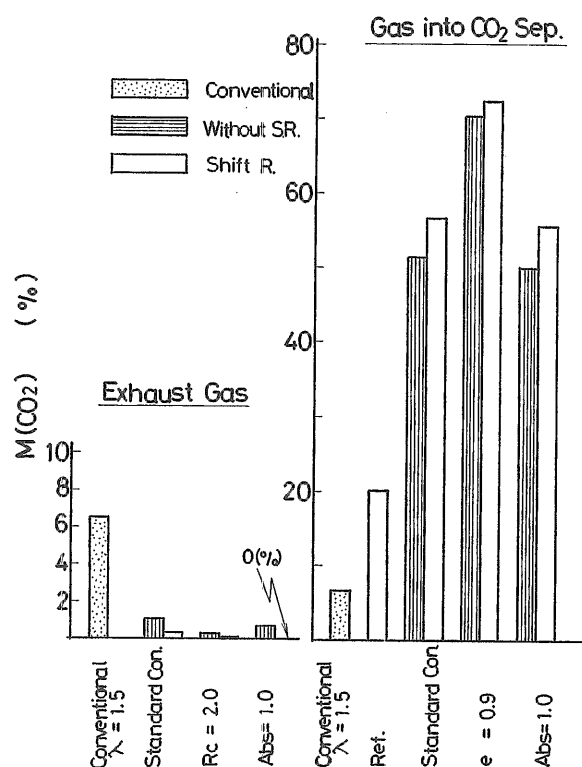


図5-4 二酸化炭素の分離・濃縮効果

気改質後分離し在来機関で燃焼させる場合(図中のRef.)と比較しても3倍前後に濃縮され、特に一パス当りの燃料利用率が高い場合、効果が大きいことがわかる。さらに、すべての場合について、シフト反応(空白棒で示す低温域におけるCO→CO₂の酸化反応)が期待できる場合は分離・濃縮効果がさらに増大する。

5.5 二酸化炭素回収率と回収所要動力

5.5.1 CO₂回収率

5.3節の性能解析において本システムによるCO₂回収率とCO₂を求め、システム圧縮比(系圧力)に対して示したのが図5-5である。圧縮比が2以下では補助燃焼が不必要となり100%の回収が可能となっている。系圧力を増加させると燃料電池本体の出力の全出力に対する比率が低下し、また電池内発熱量が減少するため補助燃焼が必要となる。このため、CO₂が一部空気極側に混入し、回収率は93%程度まで低下する。なお、図中には分離器入口ガス中のCO₂濃度を質量比率 $G(CO_2)$ で示しているが、96~97wt%とほぼ一定の値を示しており、質的に純度が高いことが判る。(注記:図5-4は体積濃度であり、両者の相違に注意を要する。)

5.5.2 CO₂回収所要動力

ところで、実際の回収操作を議論するためには図5-1に示した分離装置の型式を定める必要がある。従来提案されている回収方法の主なものとしては、化学吸収、

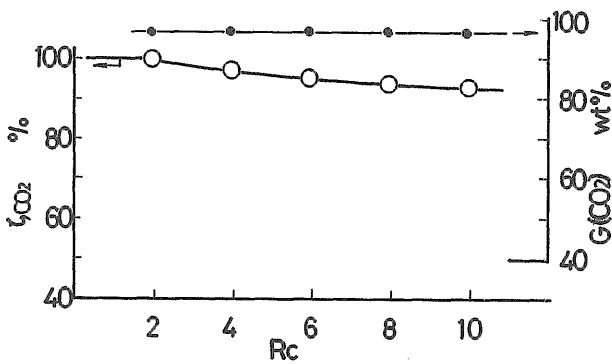


図5-5 二酸化炭素回収率

膜分離、物理吸着、純酸素燃焼を含めた圧縮分離等がある。これらの手法を用いてCO₂を回収し、さらに後処理を想定して液化するためには動力あるいは熱量を必要とし、各手法についての検討例がいくつか報告されている。

例えば、在来火力発電所の排ガスに化学吸収法を適用する場合は、ボイラ総熱量に対する絶対比率で約14~17%²⁰⁾の熱量が必要とされている。現在開発中の新火力発電方式では、液化処理も含めて検討されており、6つの組合せについて絶対比率で約9~13%(熱効率の相対的低下割合で13~33%)²¹⁾必要と報告されている。いずれも従来の火力発電所における脱硫・脱硝に必要な所内動力比率(約1.5~2%程度といわれる)に比べてかなり大きな値である。また、新火力発電方式にも含まれているが、純酸素燃焼によって回収を目指す場合は、回収動力以外に純酸素製造のため酸素1mol当りに25~30kJ程度のエネルギーを必要とする²²⁾。

5.4節において図5-3の効率計算を行った際には、これらの必要エネルギーは考慮していなかった。システムの経済性を検討するためにはこの必要動力を含めて議論しなければならない。本システムには、前述の各種回収法が適用可能と考えられるが、対象ガス中のCO₂濃度が90wt%以上と高いこと、系圧力がもともと大気圧以上に設定できること、CO₂の最終処理として液化が便利であること、などの理由から圧縮分離法を適用した場合を検討した。なお、本システムでは5.2.1項で述べたように燃料電池本体が純酸素製造の機能を有しているため、酸素製造に特別な動力を必要とせず、液化仕事だけが所要動力となる。

図5-6は、分離後のCO₂1molを圧縮し、液体として回収するのに要する動力を複合システムの圧縮比(系圧力)に対して示したものである。なお、CO₂と共存する未反応ガスの質量比率は数%以下でその圧縮動力は充分小さい。所要動力は系圧力の増加につれ減少し、圧縮比8~10において約21~23kJ/CO₂-molである。図中にはこの動力がシステム発電端出力L_{total}に占める割合(相対比率)も示しているが、4~4.5%程度である。

一方、図5-7は圧縮比(系圧力)を変化させた場合についてシステムの総合熱効率 η_{total} を示している。CO₂回収を行わない場合、熱効率は65~70%の範囲にある。CO₂を液化分離回収した場合、前述のように系圧力が低い方が圧縮仕事は増加するが、この領域ではシステムの熱効率が本来高いため総合熱効率としては圧縮比が2~4付近で64.5%と最大となる。系圧力の増加につれ62%まで低下する。したがって、回収を行わない場合と比較すると、圧縮比8~10において絶対比率(総熱量に対する割合)で2.6~3%、圧縮比2~4で4.6~6.5%程度の低下となる。これは前述の新火力発電/酸素燃焼方式の場合²³⁾よりさらに低い値である。

5.6 第5章のまとめ

固体酸化物燃料電池を中心とする複合サイクルについてシステムの概要、発電性能と総合熱効率、二酸化炭素回収率および所要動力について検討した。得られた結果をまとめると、

- (1) 燃料電池内での発熱が改質熱として有効に利用されるため、電流密度の比較的広い範囲に対して、総合熱効率は60%(LHV)以上の高い値となる。
- (2) 水蒸気が凝縮除去されるためCO₂分離装置入口の体

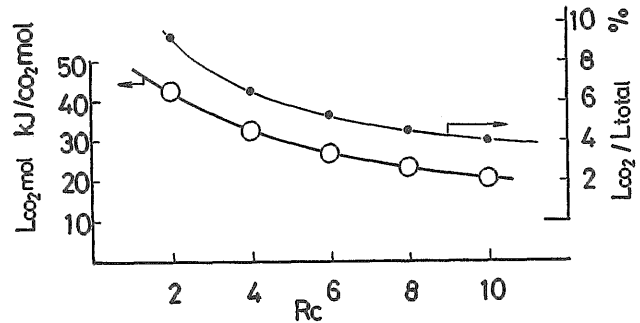


図5-6 回収所要動力と発電端出力に占める割合

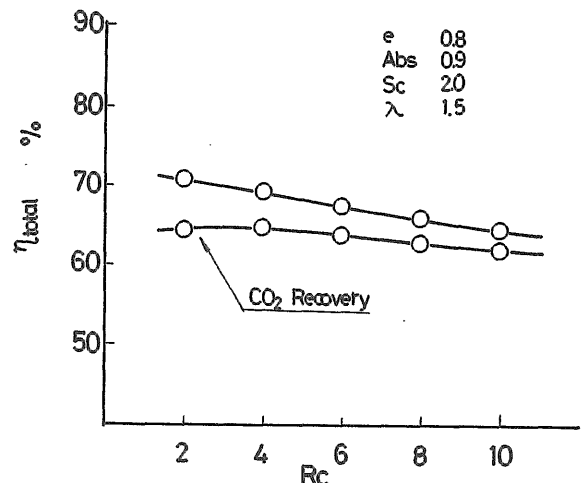


図5-7 総合熱効率に及ぼす回収動力の影響

積濃度は、「燃料の蒸気改質/CO₂分離後の熱機関利用」に対して3倍、在来機関の排気ガスに対して10倍程度に濃縮される。このため、単位プラント出力に対する処理ガス量が1/3～1/10に減少し、装置が小型化するため実用上極めて有利になると考えられる。

(3) 本システムでの二酸化炭素回収率は93～100%の範囲にあり、大気中に放出される体積濃度は在来の熱機関に対して1/10以下に減少する。

(4) この回収に必要な動力は、複合システムの圧縮比(系圧力)8～10において総入熱量に対する絶対比率で2.6～3%、圧縮比2～4で4.6～6.5%程度となる。この所要動力を考慮した総合熱効率は後者の場合で64.5%である。

6. あとがき

船舶・海洋動力として燃料電池を適用する場合に課題となる事項について検討を行った。この分野の動力としては、ディーゼル機関が、高い熱効率、低質重油に対する適応性、高信頼性などの理由から圧倒的な優位性を保っている。一方、最近の高速船等新海上輸送システム用動力としては軽量高出力の点からガスタービン機関が注目されており、国のプロジェクトとして研究開発が進行中である。

しかしながら、IMO(国際海事機構)の場でも討議されているように、海上動力に対してもNO_x、SO_x揮発性有機化合物、浮遊粒子等有害物質の規制強化が国際的な流れとなってきた。この動向に対処するため、ディーゼル機関においては燃料改善を含む排ガス対策、ガスタービン機関にあつては、NO_x低減や熱効率改善のための研究努力がなされている。ディーゼル、ガスタービン両機関は依然として燃料電池の強力なライバルであり続けるであろうと思われるが、上記の点で将来大幅な技術的進展が図られない場合には燃料電池の優位性も魅力的なものになると期待される。

燃料電池は環境調和性、熱効率の点で他の熱機関に対して有利な面を有しているが、利用可能燃料の規制やまだ開発途上技術であることによるシステムの安全・信頼性の不足、装置の小型化の必要性など考慮すべき課題も多い。

本研究はその一部として、小型・高性能化、海上条件下での使用、エネルギー利用効率改造などについて現時点で得られた成果をまとめたものである。今後さらに技術的検討を進める上の基礎資料として活用が可能であり、将来の船舶・海洋燃料電池の促進に有効な内容と考えている。また、船舶海洋分野に限らず陸上動力分野への波及効果を含め、エネルギー有効利用、地球環境保全に役立つものと期待される。

なお、燃料電池研究は、わが国だけでなく、海外、特に米国においても開発機運にあり、船舶海洋分野で

は日米運輸技術協力、日米天然資源会議(UJNR)などの場で、国際協力の可能性の検討が進められつつある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、ご協力をいただいた三井造船株式会社玉野研究所、材料試験に関して支援をいただいた当研究所材料加工部の古谷研究官に謝意を表します。さらに、本研究の一部(第5章)は平成8,9年度環境庁地球環境研究総合推進費の課題検討調査研究として実施されたものであることを付記する。

参考文献

- 1) NEDO, Proc. The 2nd IFCC (1996-2)
- 2) The Fuel Cell Seminar Organizing Committee, Proc. 1996 Fuel Cell Seminar (1996-11)
- 3) 日本造船協会, 総合報告書「新形式船用電気推進システムの試験研究」(1997-3)
- 4) 川越,他4名, 第57回船舶技研研究発表会講演論文集(1991.6),122-126.; 同第59回船舶技研研究発表会講演論文集(1992.6),1-4.
- 5) 川越,他4名, 第65回船舶技研研究発表会講演論文集(1995-6),5-8.
- 6) 川越,他4名, 第4回SOFC研究発表会講演要旨集(1995-12),83-86.
- 7) Kawagoe, Y., et al., Solid Oxide Fuel Cells V, the Electrochemical Society Inc., (1997-6), 549-556
- 8) Horita, T., Dokiya, M., et al., Solid Oxide Fuel Cells IV, the Electrical Society Inc., (1995-6), 791-800.
- 9) Aida, T. et al., *ibid.*, 801-809.
- 10) 熊倉,他4名, 第4回SOFC研究発表会講演要旨集(1995-12),29.
- 11) 熊倉,他4名, 第69回船舶技術研究発表会講演論文集(1997-6),145.
- 12) 鳥羽, 海と空, 41-3,4 (1966), 71.
- 13) Kimm M.H.P., 88-GT-109, (1985)
- 14) June C.E., Air Chemistry and Radioactivity, (1963)
- 15) 日本化学会, 化学便覧, 改3基礎編(1984),II-111.
- 16) 例えば, 藤谷他, 化学結合の見方, 考え方, (1995), 148, オーム社.
- 17) 波江,他4名, 日本機械学会論文集,59巻,565B号(1993),2702-2708.
- 18) Namie, S. et al., Proc. ASME/JSME Thermal Engg. Joint Conf., (1995), 426-430.
- 19) 波江, 他3名, エネルギー資源学会第13回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集(1997), 123-128.
- 20) 下條,他5名, エネルギー資源学会第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集(1992),

427-430.

- 21) Kagajo, T. et al., International Conf. on Power Engg.-93, Vol.1, (1993.9), 493-498.
- 22) 本庄, エネルギー・資源学会第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, (1994), 399-404.
- 23) 川越、他3名、日本船用機関学会誌 (論文)、33巻、3号 (1998)、242-249.
- 24) 熊倉、他4名、*ibid*、232-241.
- 25) 川越、他4名、第6回SOFC研究発表会講演要旨集 (1997-12)、57-60.
- 26) Kawagoe, Y., et al. Proc. Fuel Cell Seminar, (1998-11), (to be published).
- 27) 特許出願中 特願平8-165046
- 28) 特許出願中 特開平6-203845