

究極の高効率火力発電-SOFC(固体酸化物形燃料電池) トリプルコンバインドサイクルシステム

Extremely High Efficiency Power System –SOFC Triple Combined Cycle System



小林 由則^{*1}
Yoshinori Kobayashi

安藤 喜昌^{*2}
Yoshimasa Ando

加幡 達雄^{*3}
Tatsuo Kabata

西浦 雅則^{*4}
Masanori Nishiura

富田 和男^{*5}
Kazuo Tomida

眞竹 徳久^{*6}
Norihiisa Mataka

SOFC(固体酸化物形燃料電池:Solid Oxide Fuel Cell)は高温作動の燃料電池で、その高温排熱をガスタービン複合発電に活用することにより、効率70%に及ぶ極めて高効率の火力発電システムを構成することができる。三菱重工では早くからSOFCの大規模発電システムとしての可能性に注目して、1980年代から要素・システム両面の開発を進めて来た。2004年度から(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)委託研究にて、円筒形SOFCとマイクロガスタービン(MGT)を組み合わせた200kW級SOFC-MGTコンバインドサイクルシステムの製作・運転を実施し、その後実用化に向けた開発を進めている。そして2010年度からは、GTCC(ガスタービンコンバインドサイクル)にSOFCを組み合わせたトリプルコンバインドサイクルの本格的な開発に向け、東北電力(株)と共同研究をスタートし、最高効率発電システムの開発を進めている。

1. はじめに

地球温暖化抑制のためのCO₂排出量削減と、今や社会に不可欠な電力の安定供給を両立させていくために、火力発電などの集中電源により構築された高度な電力網に、再生可能エネルギーなどを合理的に組合せて行く必要があるが、その中で火力発電の高効率化は重要な位置を占める。また、エネルギー資源の保全のためにも、超高効率火力発電システムの普及による化石燃料の徹底した有効活用が必須かつ急務の課題となっている。

2. トリプルコンバインドサイクル開発の意義

これまで三菱重工では、蒸気タービンによるシンプルサイクル(1機関)の時代から、ガスタービン(GT)と蒸気タービンを組合せたダブルコンバインドサイクル(2機関複合)の隆盛に至るまで、一貫して高温化・高圧化を進めることで、常に最高効率発電への挑戦を続けて来た。(図1)そして現在、高温型燃料電池であるSOFCを付加したトリプルコンバインドサイクルの実用化に向けた開発段階にある。

トリプルコンバインドサイクルは、図2に示すようにGTCCの上流にさらにSOFCを組合せたものである。SOFCは、ガスタービン燃焼器の上流の高圧部に設置されるため、セラミックス製の堅牢な構造体である円筒形SOFCが適している。トリプルコンバインドサイクルシステムのエネルギーバランス例を図3に示す。石炭を含む化石燃料の持つエネルギーを、SOFC、ガスタービン、蒸気タービンの3段階にカスケード利用することにより、極めて高い効率で発電することが出来る。現状のあらゆる熱機関に較べて圧倒的な効率向上が見込まれている。

*1 原動機事業本部新エネルギー事業推進部次長

*3 原動機事業本部新エネルギー事業推進部首席技師

*5 原動機事業本部新エネルギー事業推進部 工博

*2 原動機事業本部新エネルギー事業推進部グループ長

*4 原動機事業本部新エネルギー事業推進部課長

*6 技術統括本部長崎研究所

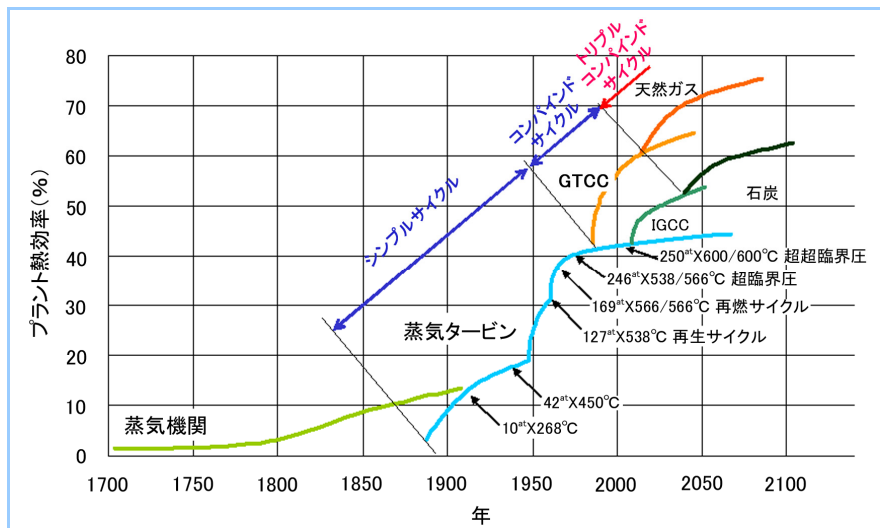


図1 発電効率の変遷

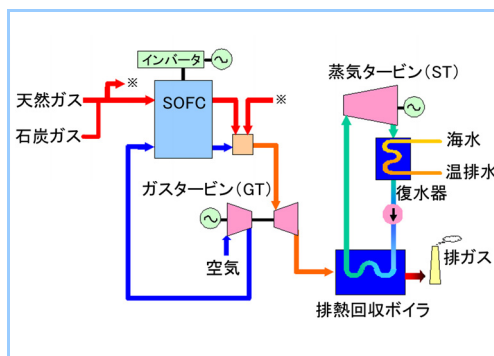


図2 トリプルコンバインドサイクルシステム

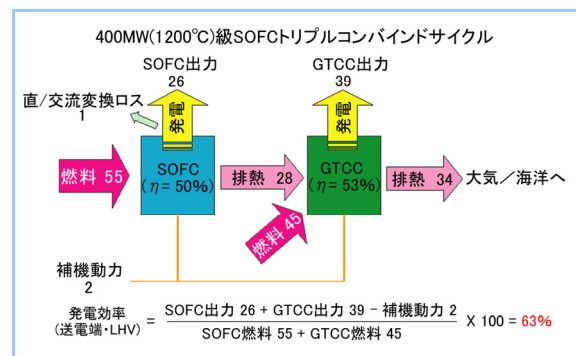


図3 トリプルコンバインドサイクルシステムのエネルギーバランス例

3. 開発状況

3.1 円筒形 SOFC の構成

円筒形 SOFC の発電要素であるセルスタックの構造を図4に示す。セラミックス製の構造部材である基体の外表面に発電反応を行なう電池(燃料極/電解質/空気極の積層体)を形成し、電子導電性セラミックスのインタコネクタで電池間を直列に接続している。セルスタックを束ねて数 kW ～数十 kW の電気出力とし、支持、燃料・空気の供給排出、電流の取り出しの機能を持たせて、カートリッジを構成している。カートリッジを必要な容量だけまとめて圧力容器の中に入れてモジュールを形成している(図5)。

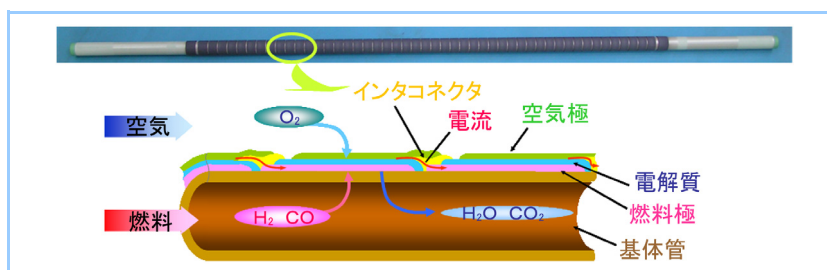


図4 円筒形セルスタックの構造

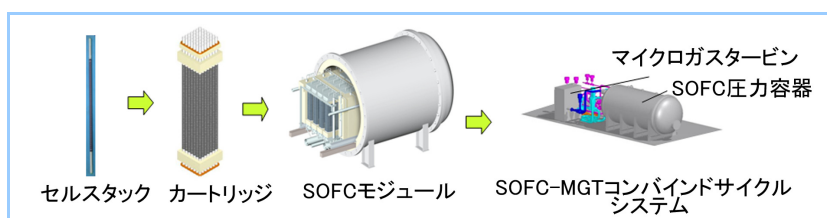


図5 SOFC 発電システムの構成

このような階層構造を取ることで、据付やメンテナンス性まで考慮したシステム化を狙っている。そして、この SOFC 加圧モジュールとガスタービンを組み合わせることによって、SOFC コンバインドサイクルシステム(図6)を実現している。このシステムでは、SOFC の加圧モジュールを MGT の燃焼器の上流に設置する。燃料の都市ガスはまず SOFC に投入され、燃料の化学エネルギーが SOFC で直接電力に変換される。その後、残燃料は MGT 燃焼器に供給される。一方、空気は MGT 圧縮機で 0.3MPa-a 程度まで昇圧された後で SOFC に供給されて、酸化剤として一部が使用された後、高温排熱とともに再び MGT に送られ、空気の持つ顕熱や圧力もエネルギーとして下流の MGT 側で電力に変換されることにより、システム全体では高い発電効率を得ることが可能となる。

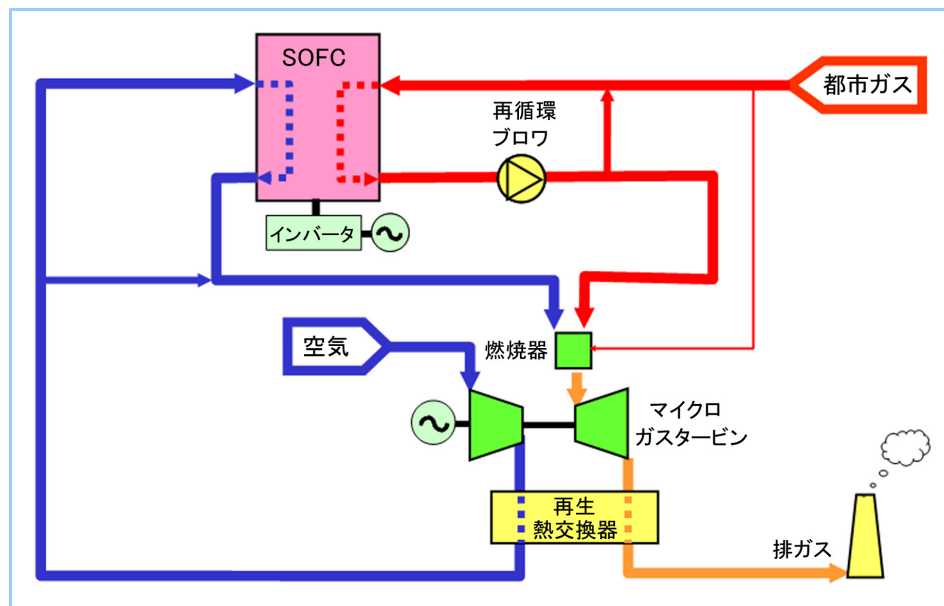


図6 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステム

3.2 SOFC と MGT コンバインドサイクルシステムの開発

NEDO 委託研究にて、200kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルを設計・製作し、2007 年に初期性能確認の為に運転試験を実施した(図7)。運転試験では、世界最大級の出力 229kW-AC 発電端(SOFC204kW-DC/188kW-AC, MGT41kW-AC)を確認した。また効率確認運転においては、送電端出力 204kW-AC の運転点にてクラス最高レベルの 52.1%-LHV を確認し、効率についても目標値 50%-LHV を上回る性能を確認した(表1)。

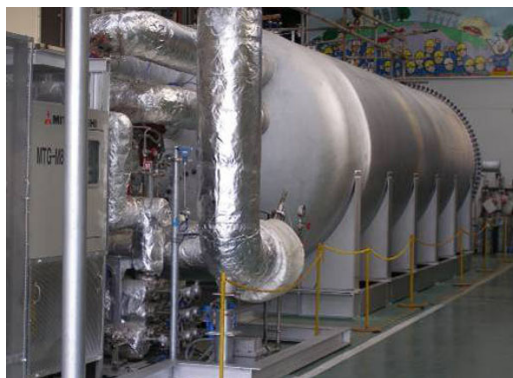


図7 200kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステム

表1 200kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステムの性能試験結果

項 目	
SOFC 燃料入熱	339.8 kW-th
MGT 燃料入熱	51.5 kW-th
SOFC 発電出力	186.8 kW-DC
SOFC 発電出力	176.3 kW-AC
MGT 発電出力	34.8 kW-AC
発電端出力	211.1 kW-AC
補機動力	7.1 kW-AC
送電端効率(LHV 送電端)	52.1 %

2009 年には SOFC-MGT コンバインドサイクルシステムにて長時間運転試験を実施した。3224 時間の発電運転にて SOFC の経時性能劣化は認められず、またこの間の4回の停止再起動(熱サイクル)でも性能低下は認められなかった(図8)。

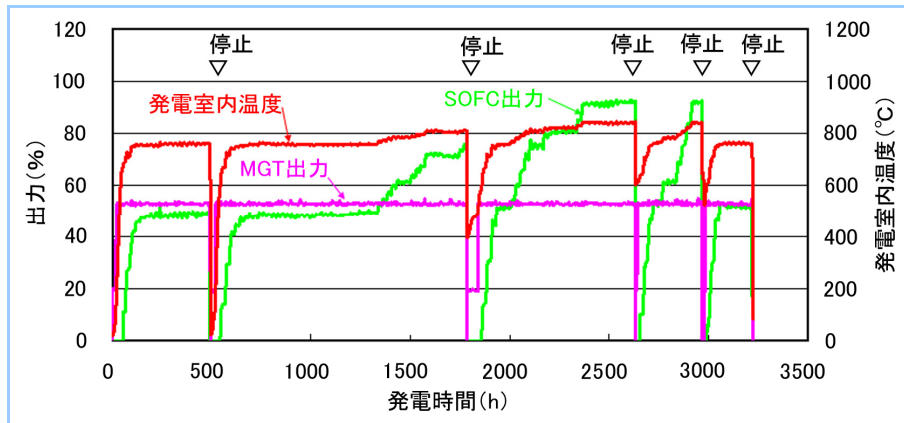


図8 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステム長期運転結果

3.3 円筒形 SOFC 発電システムの改良開発

2008 年度から、NEDO 開発プロジェクトでセルスタック、モジュール、発電システムに対してそれぞれ信頼性向上と高圧運転技術開発・高効率化を進めている。

セルスタックの耐久性向上のため、当社の円筒形セルスタックの経時変化を参加研究機関で分析・考察した結果を反映し、経時変化の主要因であると考えられる空気極中間層部での陽イオン移動の抑制を図ったセルスタックを試作した。常圧で 6000 時間以上の連続発電試験を実施し、経時電圧低下率 0.13%/1000 時間(NEDO 目標 0.25%/1000 時間以下)を達成した(図9)。

モジュールのコンパクト化のため、その構成要素であるカートリッジへのセルスタック装填密度を従来の 1.7 倍に増した密充填構造カートリッジを設計・試作した。試作したカートリッジにて運転試験を実施した。密充填化に伴う発電室内部での発熱密度が増加することに対応して伝熱・冷却設計を行った結果、従来カートリッジと同等の発電特性が得られた(図10)。

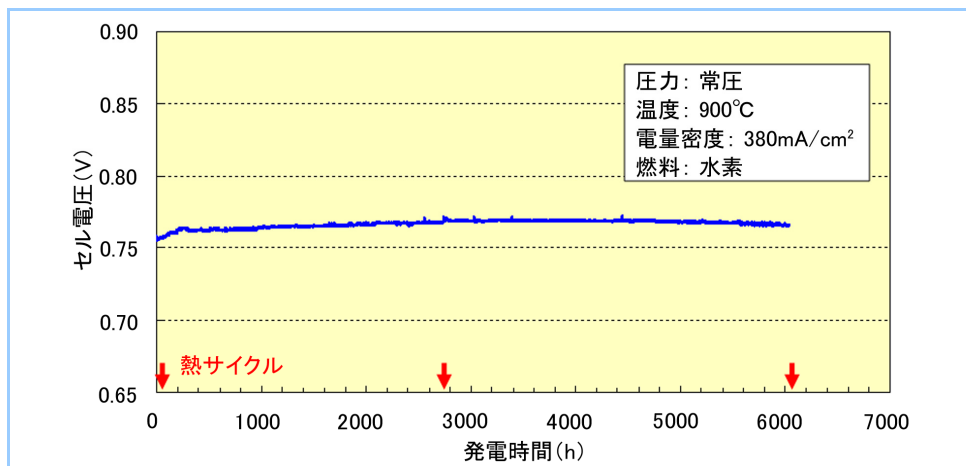


図9 改良セルスタックの長時間試験結果

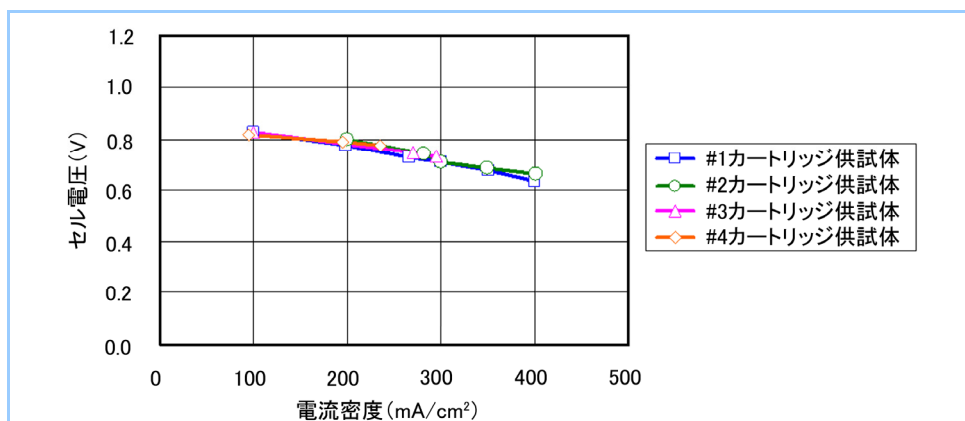


図10 密充填構造カートリッジ性能

システム全体の信頼性向上のために、MGT は、商用機として実績の豊富な(株)トヨタタービンアンドシステム製のものを使用し、トヨタ自動車(株)と当社の共同開発にてシステム全体性能・信頼性を高めるように計画を実施した。システムの保護要件(SOFC 燃料・酸素欠乏状態の回避、MGT 過回転の防止など)を考慮して、200kW 級 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステムの保護ロジックを制作し、起動・定常運転・緊急停止試験を実施した。保護インターロックが正常に動作し、SOFC モジュール・MGT を損傷することなく安全に運転停止可能であることを確認した(図11)。

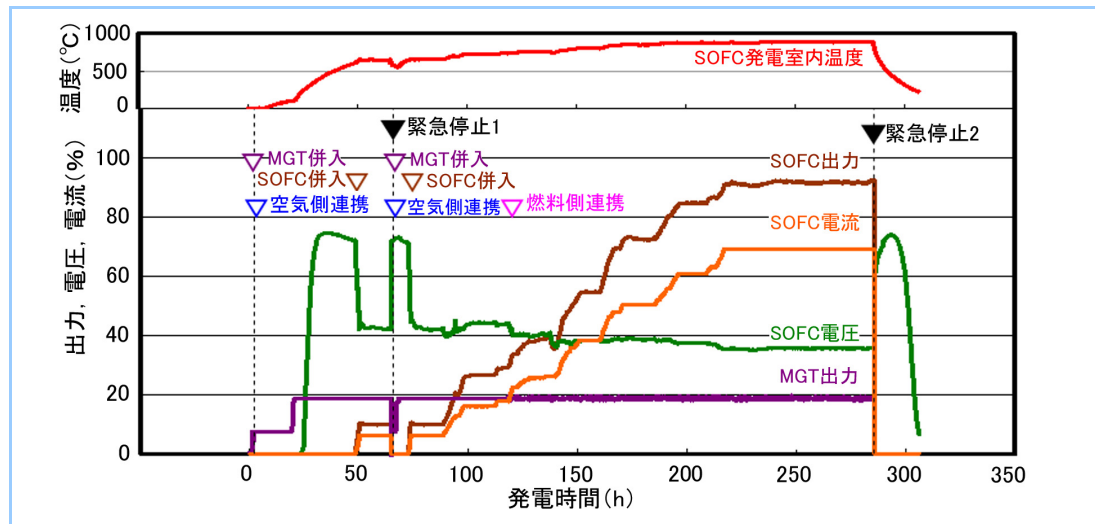


図11 SOFC-MGT コンバインドサイクルシステム試験運転結果

トリプルコンバインドシステムは、事業用ガスタービンと SOFC を組み合わせるシステムで、SOFC 作動圧力は1~2MPa-a となる。作動圧力の上昇に伴い SOFC の運転電圧は上昇する。一方で空気・燃料の流速が小さくなり、伝熱量の確保が必要となるが、前述の密充填構造カートリッジにて、高圧下での発電室内の温度分布や酸素濃度分布の予測を行い、2MPa-a でも必要な伝熱量は確保されており、発電に支障の無い温度分布が得られていること、セル近傍の最低酸素濃度は圧力の影響がほとんどないことを確認した(図12)。

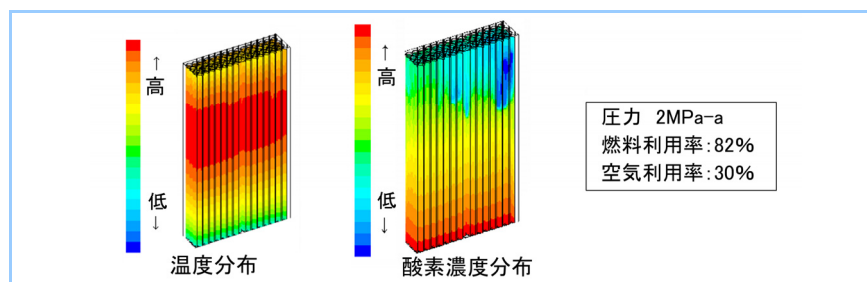


図12 高圧下での温度分布・酸素濃度分布予測結果

3.4 SOFC-MGT 複合発電実証機の計画

これまでの成果を踏まえ、2011~2012 年度に NEDO プロジェクトで 250kW 級 SOFC-MGT 複合発電実証機の製作・実証を行い(図13)、市場投入を行っていく予定である。

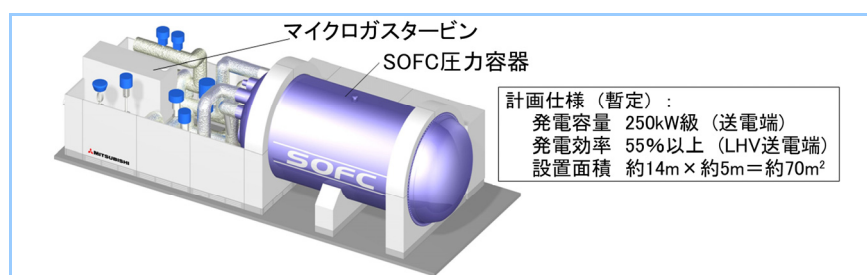


図13 250kW 級 SOFC-MGT 複合発電実証機計画

4. トリプルコンバインドサイクルシステムの実用化に向けて

SOFC 発電システムのロードマップを図14に示す. 分散電源用の 200kW~MW 級の発電設備 (コージェネレーションを含む)については, 実証に引き続き市場に提供し, ユーザの評価を受けていきたい.

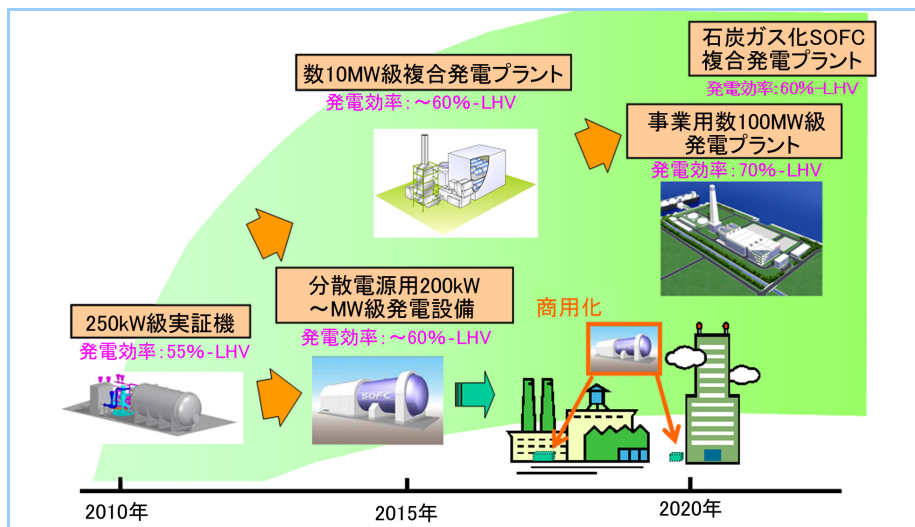


図14 SOFC 発電システム開発ロードマップ

トリプルコンバインドサイクル発電の実用化に向けては, 初期の導入期においては SOFC の製造設備の量産体制なども考慮して, 比較的小容量のトリプルコンバインドサイクルシステムから導入していくこととしたい.

将来の 800MW 級トリプルコンバインドサイクルシステムを図15に示す. 天然ガスを燃料として SOFC と GT(ガスタービン)と ST(蒸気タービン)のトリプルコンバインド発電による最高効率の発電システムであり, このトリプルコンバインドサイクルシステムこそが, 当社が狙う究極の SOFC の製品コンセプトである.

天然ガス焼き数百 MW 級トリプルコンバインドサイクルシステムでは, 送電端発電効率は 70%-LHV 以上となり, 石炭を燃料とした数百 MW 級石炭ガス化(IGCC)-SOFCトリプルコンバインドサイクル (図16)においても, 送電端発電効率は 60%-LHV 以上の超高効率発電が期待できる.

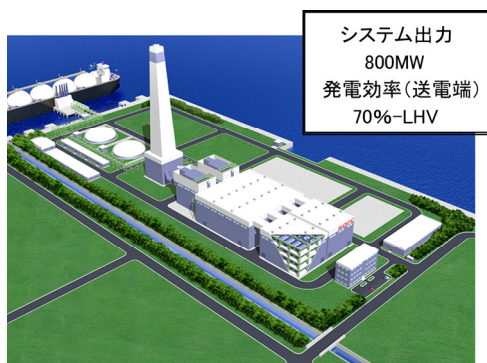


図15 天然ガス焼き 800MW 級トリプルコンバインドプラント

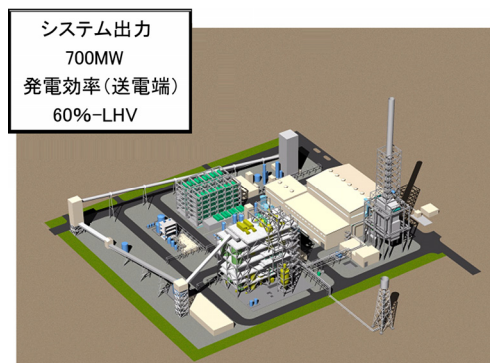


図16 石炭ガス化-SOFCトリプルコンバインドプラント

5. まとめ

CO₂ 排出量削減と電力の安定供給を両立させていくための実効性のある技術開発が急務となっている今日, 化石燃料を利用した超高効率発電システムの早期実用化に対する期待は大きい. 当社では, SOFC トリプルコンバインドサイクル発電システムを電力事業に於ける当面の CO₂ 削減の切札の一つと位置づけ, 着実に技術を確認させるとともに早期実用化を進め, 21 世紀の安全で持続可能なエネルギー環境社会構築に大きく貢献していきたいと考えている.