

加圧水型原子炉を組み合わせた 閉サイクル型純酸素燃焼ガスタービン発電プラント

Closed Cycle Oxy-Fuel Combustion Gas Turbine Power Plant Combined with Pressurized Water Nuclear Reactor

大島 寛 司^{*}・内山 洋 司^{*}

Kanji Oshima

Yohji Uchiyama

(原稿受付日 2010 年 1 月 25 日, 受理日 2010 年 6 月 11 日)

We propose a new closed cycle oxy-fuel gas turbine power plant that utilizes a nuclear heat generator. A pressurized water reactor (PWR) is designed to supply saturated steam to an oxy-fuel gas turbine for a specific power output increase. The saturated steam from the reactor can have lower pressure and temperature than those of an existing PWR. In this study, we estimated plant performances from a heat balance model based on a conceptual design of a hybrid plant for different inlet pressures of the gas turbine. The generating efficiency of an oxy-fuel gas turbine plant without a nuclear steam generator is estimated to be less than 35%. In contrast, the proposed plant has more than 40% of the whole generating efficiency. In the proposed plant, the power output contributed by a PWR is obtained by subtracting the LNG contribution from the whole power output. Supposing the generating efficiency of the LNG system in the proposed plant equals to that of the conventional plant, the efficiency of PWR system contributing to increase the generating performances of the proposed plant is estimated to be around 45%, even if the steam conditions are lower than in an existing PWR.

1. はじめに

地球温暖化問題対応のための二酸化炭素の排出抑制やエネルギーセキュリティ保障の観点から、原子力発電は世界各国で再注目され始めている。しかし、効率面に着目すると化石燃料火力発電では高温高压の蒸気(例: 550 [°C]・30 [MPa])を用いて 45 [%]前後の発電効率(送電端・LHV 基準)を達成しているのに対し、原子力発電では安全性を重視していることから原子炉で生成できる蒸気は圧力 5~7 [MPa]・温度 250~300 [°C]と火力発電に比べて低く、発電効率は 35 [%]以下に留まっているのが現状である。発電効率の向上はコスト低減という経済性のみならず二酸化炭素排出抑制にも重要な課題である。その一方で発電プラントの性能を向上する別の流れとして、コンバインドサイクル等のエネルギー技術の複合化に向けた研究開発も行われている。その中でも特に新しい発想に、蒸気条件を高められず火力発電に用いても高効率を望めない炉を、他の発電プラントの補助的な加熱源にすることで従来よりも有効に活用するものがある。例えば、バイオマス・廃棄物焼却炉は塩酸系燃焼ガス等の発生による高温腐食を避けるために蒸気の温度・圧力が抑えられているが、化石燃料火力発電との組み合わせによる活用¹⁾²⁾が考案された。また筆者らは加圧水型原子炉(PWR)の化石燃料火力発電との複合化³⁾の提案を行っている。

本研究ではその発想に基づき、閉サイクル型純酸素燃焼

ガスタービンの補助加熱に PWR を活用することで、効率的な原子力利用を目指す新しい発電プラントを提案する。この方法によると、PWR の小型化や蒸気条件の引き下げも可能になるため、安全対策が容易になるだけでなく設計の簡素化にも重点を置くことができると考えられる。その結果として原子力プラントの免震構造設計の採用、ひいては需要地近接立地等への発展に貢献できると期待される。本稿では提案するプラントの概念設計を行い、ヒートバランス計算から求めた発電効率等の性能を紹介する。

2. 分析する発電プラント

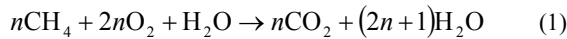
2.1 閉サイクル型純酸素燃焼ガスタービンの概要

純酸素燃焼ガスタービンは主に液化天然ガス(LNG)などの燃料を酸素のみで燃焼させる内燃機関であり、燃焼生成物として発生するのは、ほぼ水と二酸化炭素のみである。従って、ガスタービンの一種でありながら窒素酸化物等の大気汚染物質対策を行う必要はない。また、閉サイクルのものは復水器によってタービン背圧が従来の火力発電の背圧に近い低さに保たれ、タービン出力を大きく取り出せるとともに膨張後の排気中の水と二酸化炭素を容易に分離できるという特徴を有している。地球温暖化対策の中でも炭素回収隔離が可能な発電技術として期待されている⁴⁾。LNG 燃料を用いる発電技術としてはコンバインドサイクル発電が効率の高さで知られているが、二酸化炭素回収を行う場合、その回収率は 85%前後に留まるにも関わらず発電効率は大きく低下する⁵⁾。それに対し、閉サイクル型純酸素燃焼ガスタービンならば 99%以上の二酸化炭素を回収

^{*}筑波大学大学院システム情報工学研究科リスク工学専攻
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

できる上、回収で消費するエネルギーは少なく、さらに回収設備の費用も安く済む⁶⁾⁷⁾。

純酸素燃焼ガスタービンでは燃焼器に大量に注入する水などの流体を主要な作動流体の一つとして見なせる。注入流体として水を使用する場合に燃焼器内で生じる理想的な化学反応を式(1)に示す。



ここで n は注入流体 1 単位あたりに必要な LNG 燃料(100% CH_4)を表わしている。注入流体の流量が同じならば、その注入流体の温度が高いほど必要な燃料や酸素は少なく済み、燃焼後に発生する CO_2 も減少する。ゆえにガスタービン排気を利用する再生加熱器が導入されていることが多い。しかしそれだけでは十分に高温化できない場合には、圧縮機を利用する補助的なサイクルを追設する方法⁸⁾の他、外部の熱源を用いて加熱する方法も提案されている。後者の方法としては、別の発電所の蒸気を利用する方式⁹⁾や、太陽熱で加熱するシステム¹⁰⁾などが挙げられる。この方法は、純酸素を必要とせず二酸化炭素の発生しない外部熱源で注入流体の加熱の一部を代替することが有効なだけでなく、必要な投入熱量の総量が外部加熱をしない場合よりも少なく済むという利点がある。純酸素燃焼ガスタービンは内燃機関であり、注入流体と同様に作動流体として役割を担う燃焼生成物の温度の調節も考慮せねばならず、従来の燃焼器内での加熱のみでは多くの熱量を必要とするからである。ゆえに外部加熱を行えば燃料や酸素の消費量・二酸化炭素の発生量を抑えられ、酸素製造動力や二酸化炭素回収動力も削減できるため、最終的に正味の発電効率が向上するのである。

2.2 分析の前提条件

本研究でヒートバランス分析を行うにあたって、先行研究⁴⁾を参考に前提条件として設定した、プラントを構成する各種機器の諸元等を表 1 に示す。なお本研究ではヒートバランス分析は LHV 基準で行うとし、プラントのサイクル上の各プロセスにおける作動流体の熱物性値を求める際には Techware Engineering Applications 社のソフトウェアの @Gas Version 3.0 Gas Properties for Windows を使用した。

分析する発電プラントの燃焼器入口圧力は 2.00～5.00 [MPa]の範囲(間隔は 1.00 [MPa])に設定したが、この圧力は燃焼器に注入する燃料・酸素・ H_2O の圧力に等しくプラントの主圧力を意味しているが、既存のガスタービンの燃焼器入口圧力や従来の PWR で生成する飽和蒸気の圧力を意識したものである。発電プラントの規模の設定としては様々なケースが考えられるが、本研究ではどの燃焼機入口圧力のケースでも送電端発電出力が 500 [MW]となるよう

調整することに決めた。ガスタービン入口温度については、現在では 1500 [deg C]以上に達するものもあるが、本研究では 1300 [deg C]に設定した。

表 1 分析の前提条件

燃焼器入口圧力 [MPa]	2.00～5.00
送電端発電出力 [MW _e]	500
ガスタービン入口温度 [deg C]	1300
復水器入口圧力 [MPa]	0.008
酸素過剰率 [%]	5.0
ガスタービン断熱効率 [%]	92
ポンプ断熱効率 [%]	78
発電機・機械効率 η_{gm} [%]	98
燃焼機圧力損失 [%]	5.00
所内動力率 d_{au} [%]	2.00
LNG 低位発熱量 q_{LNG} [MJ/kg _{LNG}]	50
酸素製造動力 w_{O_2} [MJ/kg _{O₂}]	1.47
二酸化炭素回収動力 w_{CO_2} [MJ/kg _{CO₂}]	0.73

復水器入口圧力は 0.008 [MPa]で、従来の汽力発電では 0.005 [MPa]であることを考えるとやや高めである。これはタービン排気中の二酸化炭素が不凝縮性であり、復水器の冷却効率の低下に対策するためである。酸素製造動力・二酸化炭素回収動力にはそれぞれ酸素・二酸化炭素の圧縮に必要な動力も含まれているが、燃焼器入口圧力によらず常に一定の原単位であるとした。

2.3 従来プラントの分析方法

提案する複合型発電プラントの分析を行うには、まずは基準となる閉サイクル型純酸素燃焼ガスタービンの従来プラントを想定する必要がある。純酸素燃焼ガスタービンは上述したように様々なタイプのものが考案されているが、本研究では原子力の寄与を明瞭にするため、先行研究¹⁰⁾を参考に比較的単純なサイクルのものを従来プラントとしてモデルを構築した。図 1 に本研究で分析したモデルの一つを示す。すなわちタービン排気で加熱した高温水を燃焼器に注入して天然ガスを純酸素燃焼させるサイクルである。

従来プラントのヒートバランス諸量の算定に必要な、サイクル中の各プロセスの比エンタルピーは h_i 、質量流量は m_i として図 1 中に示している。従来プラントの送電端発電出力 W [MW_e]は、酸素製造と二酸化炭素回収をプラント内で行う場合を基本ケースとして想定すると式(2)のように表される。ここで η_{gm} は発電機・機械効率、 d_{au} は所内動力率、 w_{O_2} は酸素製造動力、 w_{CO_2} は二酸化炭素回収動力である。分析の前提条件の一つとして前述したが、本研究では燃焼器入口圧力がどの値のケースでもこの W が 500 [MW_e]

になるようプラントのヒートバランスを調整した。

$$W = \eta_{\text{gm}} \{ (1 - d_{\text{au}}) \{ m_4 (h_4 - h_5) - m_1 (h_9 - h_8) \} - m_3 w_{\text{O}_2} - m_7 w_{\text{CO}_2} \} \quad (2)$$

LNG の燃焼による投入熱量 Q [MW] は式(3)で表される。

投入熱量 Q は LNG 注入流量 m_2 [kg_{LNG}/s] と LNG 発熱量 q_{LNG} [MJ/kg_{LNG}] の積である。

$$Q = m_2 q_{\text{LNG}} \quad (3)$$

従来プラントの送電端発電効率 η [%] は式(4)に表す。

$$\eta = W/Q \quad (4)$$

すなわち一般的な熱工学の発電効率の定義に基づいて W の Q に対する比として求められる。

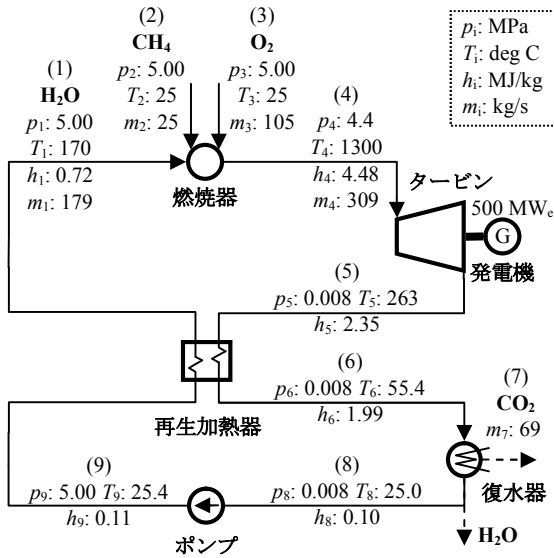


図1 従来プラントのモデル (燃焼器入口圧力: 5.00 [MPa])

2.4 提案プラントの分析方法

本研究で提案する PWR と閉サイクル型純酸素燃焼ガスタービンの複合型発電プラントは、純酸素燃焼ガスタービンの排気によって再生加熱されてできる高温水をさらに PWR で飽和蒸気になるまで加熱するというものである。図2 に本研究で分析した提案プラントのモデルの一つを示す。元々蒸気温度を高められない PWR を低温側の加熱に活用し、LNG 燃焼は専ら高温側の加熱に用いる点に合理性がある。なお蒸気が直接燃焼器に注入されるため、軽水原子炉の形式としては蒸気が僅かながら放射能を帯びる沸騰水型原子炉(BWR)は適していないと考えられる。提案プラントのヒートバランス諸量の算定に必要な、サイクル中の各プロセスの比エンタルピーは h'_i 、質量流量は m'_i として図2中に示している。

提案プラント全体での送電端発電出力 W' [MW_e] は酸素製造と二酸化炭素回収をプラント内で行う場合を基本ケー

スとして想定すると式(5)で表わされる。

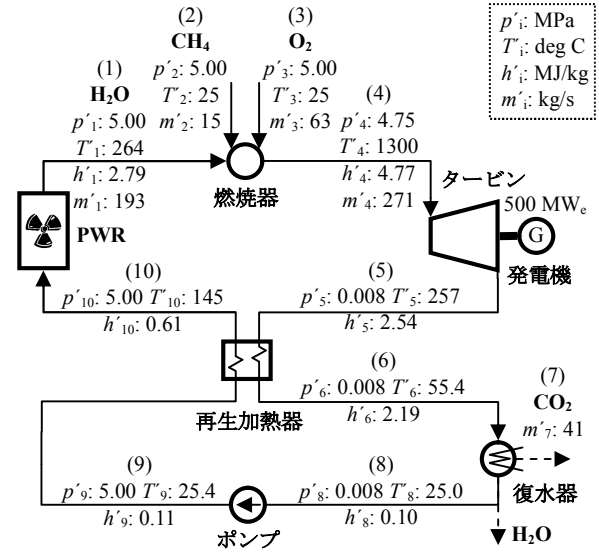


図2 提案プラントのモデル (燃焼器入口圧力: 5.00 [MPa])

従来プラントの送電端発電出力 W と同様に、 η_{gm} は発電機・機械効率、 d_{au} は所内動力率、 w_{O_2} は酸素製造動力、 w_{CO_2} は二酸化炭素回収動力であり、これらは従来プラントの値と共通である。

$$W' = \eta_{\text{gm}} \{ (1 - d'_{\text{au}}) \{ m'_4 (h'_4 - h'_5) - m'_1 (h'_9 - h'_8) \} - m'_3 w_{\text{O}_2} - m'_7 w_{\text{CO}_2} \} \quad (5)$$

提案プラント全体での投入熱量 Q' [MW] は式(6)のように LNG 燃料の燃焼による加熱量と PWR での核反応による加熱量の和で表わされる。前者は式(7)の通り提案プラントの LNG 注入流量 m'_2 [kg_{LNG}/s] と LNG 発熱量 q_{LNG} [MJ/kg_{LNG}] の積であり、後者は式(8)に示すように PWR 出入口間のエンタルピー差に等しいとした。

$$Q' = Q'_{\text{LNG}} + Q'_{\text{PWR}} \quad (6)$$

$$Q'_{\text{LNG}} = m'_2 q_{\text{LNG}} \quad (7)$$

$$Q'_{\text{PWR}} = m'_1 (h'_1 - h'_9) \quad (8)$$

提案プラント全体での送電端発電効率 η' [%] は式(9)のように表される。 η' と同様に一般的な熱工学の発電効率の定義に基づいており、 W' の Q' に対する比として求められる。

$$\eta' = W'/Q' \quad (9)$$

提案プラント全体での送電端発電出力 W' [MW_e] は、式(10)に示すように LNG 寄与分の発電出力 W'_{LNG} [MW_e] と PWR 寄与分の発電出力 W'_{PWR} [MW_e] に分けられると考えれば、LNG 寄与分の発電効率 η'_{LNG} [%] は式(11)で、PWR 寄与分の発電効率 η'_{PWR} [%] は式(12)で表すことができる。 η'_{PWR} を評価する際には、従来の原子力発電の効率が基準の

一つとなると考えられる。

$$W' = W'_{\text{PWR}} + W'_{\text{LNG}} \quad (10)$$

$$\eta'_{\text{LNG}} = W'_{\text{LNG}} / Q'_{\text{LNG}} \quad (11)$$

$$\eta'_{\text{PWR}} = W'_{\text{PWR}} / Q'_{\text{PWR}} \quad (12)$$

ただし、複合型発電プラントにおける各熱源の寄与に基づく発電出力の配分方法、すなわち各熱源の寄与分の発電効率の定義方法はまだ確立していない。例えば、太陽熱を活用する純酸素燃焼ガスタービンに関する研究¹⁰⁾では、LNG 寄与分の発電効率は現行の LNG コンバインドサイクル発電の効率に等しいと設定して太陽熱寄与分の発電効率を算定していたり、またバイオマス・廃棄物焼却炉と化石燃料火力発電を組み合わせた複合型発電プラントに関する研究¹¹⁾²⁾では、焼却炉の導入によって増加した正味の発電出力を焼却炉寄与分の発電出力とみなしていたりと、研究によって大きく異なる。そこで本研究では、式(13)のように PWR 寄与分の発電効率 η'_{PWR} は LNG 寄与分の発電効率 η'_{LNG} の関数として表すことにした。式(10)、式(11)から分かるように $W' - Q'_{\text{LNG}}\eta'_{\text{LNG}}$ は W'_{PWR} に等しいため、 η'_{PWR} は W'_{PWR} の Q'_{PWR} に対する比であると言える。

$$\eta'_{\text{PWR}} = (W' - Q'_{\text{LNG}}\eta'_{\text{LNG}}) / Q'_{\text{PWR}} \quad (13)$$

なお η'_{LNG} には、燃焼器入口圧力が同じケースの従来プラントの送電端発電効率 η を中心に前後 10 [%-points]程度の範囲の値を与えることにした。

3. 分析結果

3.1 従来プラントの分析結果

従来プラントの主なヒートバランス諸量の算定結果を表 2 に燃焼器入口圧力毎に示す。本研究で従来システムとして分析対象とした純酸素燃焼ガスタービンは図 1 に示したように単純なサイクルであるため、送電端発電効率はおよそ 40 [%]以下に留まっている。燃焼器入口圧力が低いほどタービン出口温度が高まるため再生加熱による注入 H_2O の高温化は促進されるが、タービン動力出力は低下するため、最終的に発電効率は悪化している。

表 2 従来プラントの主なヒートバランス諸量

	燃焼器入口圧力 [MPa]			
	2.00	3.00	4.00	5.00
W [MW _e]	500			
Q [MW _i]	1310	1278	1260	1248
η [%]	38.2	39.1	39.7	40.1

本研究では従来プラントで二酸化炭素の回収を行わないケース・酸素製造を行わなくても済むケース・およびその両方のケースについても分析し、それぞれ式(2)の内の w_{CO_2} を無視・ w_{O_2} を無視・ w_{CO_2} と w_{O_2} の両方を無視して 0 を代入することで送電端発電出力・発電効率を算定した。それらの送電端発電効率の算定結果を図 3 にガスタービン燃焼器入口圧力毎に示す。

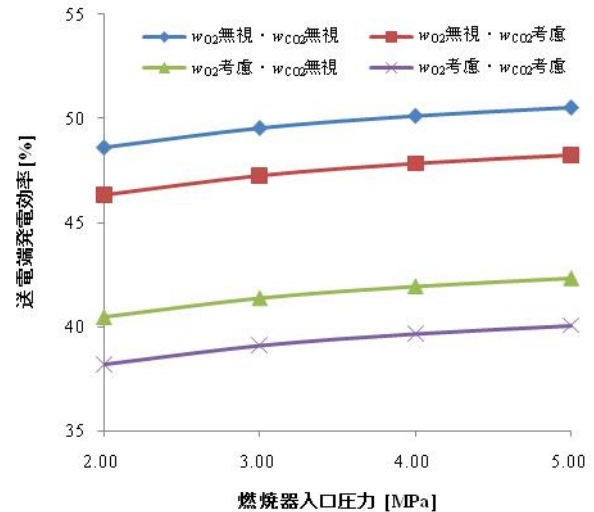


図 3 従来プラントの送電端発電効率

従来プラントは図 1 に示した通り比較的単純なサイクルのものだが、二酸化炭素を回収せず、酸素も製造せずに済むケースでは 50 [%]前後の効率を達成できることが分かる。従来プラントの CO_2 回収に伴う発電効率の低下は、「 w_{O_2} を無視・ w_{CO_2} を考慮」のケースと「 w_{O_2} を無視・ w_{CO_2} を無視」のケースを比べると分かるが 3 [%-points]以下である。同種の燃料を使用する LNG コンバインドサイクル発電で CO_2 回収を行う場合、脱炭率 85 [%]程度でも発電効率は約 7 [%-points]低下する⁵⁾ことを考えると、純酸素燃焼ガスタービンの CO_2 回収性能の高さが分かる。一方、酸素は製造するが二酸化炭素は回収しないケースに着目すると、酸素製造の有無による発電効率の違いは約 8 [%-points]であった。

3.2 提案プラントの分析結果

提案プラントの主なヒートバランス諸量を表 3 に燃焼器入口圧力毎にまとめている。提案プラント全体で送電端発電効率 η' は従来プラントの送電端発電効率 η よりも 2.5 [%-points]程度高い結果となった。この理由は前述の通り、PWR の働きによって同じ送電端発電出力を得るのに必要な燃料・酸素がおよそ二酸化炭素の発生が少なく済み、酸素製造・二酸化炭素回収にかかる動力を削減できたことが大きいからだと考えられる。提案プラント全体での投入熱量 Q' に占める LNG 寄与分の投入熱量 Q'_{LNG} の割合は 64.1

～66.5 [%], PWR 寄与分の投入熱量 Q'_{PWR} の割合は 33.5～35.9 [%]であった。燃焼器入口圧力が高いほど Q'_{LNG} は小さく、 Q'_{PWR} は大きいことが分かる。

表 3 提案プラントの主なヒートバランス諸量

		燃焼器入口圧力 [MPa]			
		2.00	3.00	4.00	5.00
W'	[MW _e]	500			
Q'		1230	1200	1183	1171
Q'_{LNG}	[MW _i]	818	783	763	751
Q'_{PWR}		412	418	420	421
η'	[%]	40.7	41.7	42.3	42.7

提案プラントについても、二酸化炭素の回収を行わないケース・酸素製造を行わなくても済むケース・およびそれら両方のケースの分析を従来プラントの分析と同様に行った。図 4 にそれらのケースの提案プラントの送電端発電効率の算定結果を示す。二酸化炭素を回収せず、酸素を製造せずに済むケースの提案プラントの発電効率は図 3 に示した同ケースの従来プラントの発電効率より低い。これは、提案プラント内の PWR の存在意義が酸素製造動力と二酸化炭素回収動力の削減にあることを意味している。提案プラントでは従来プラントと同じ送電端発電出力を得るのに必要な LNG 燃料・酸素は少なく済み、発生する二酸化炭素も減少する。そのため、「 w_{O_2} を無視・ w_{CO_2} を無視」のケースと「 w_{O_2} を無視・ w_{CO_2} を考慮」のケースを比べると分かるように二酸化炭素回収に伴う発電効率の低下は従来プラントより小さく、発電プラントの中でも効率的な二酸化炭素回収を行いやすいという閉サイクル型純酸素燃焼ガスタービンの長所がさらに伸びたと見なせる。

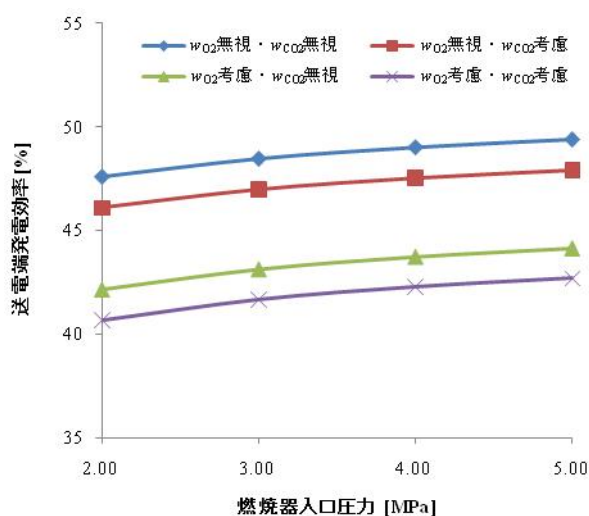
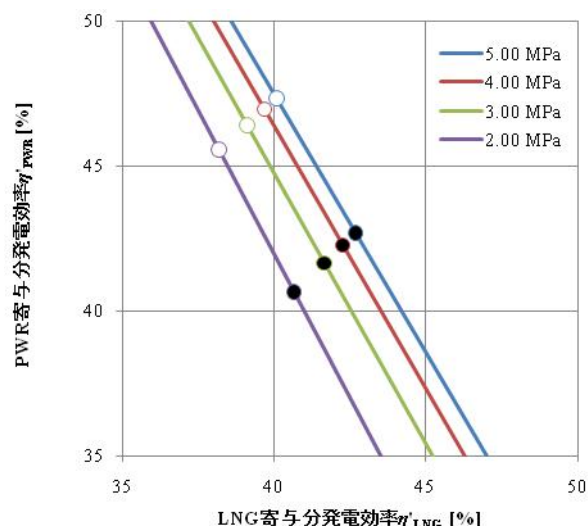


図 4 提案システムの送電端発電効率

同様に、酸素製造に伴う発電効率の低下も従来プラントより小さく、「 w_{O_2} を無視・ w_{CO_2} を無視」のケースと「 w_{O_2} を考慮・ w_{CO_2} を無視」のケースの間の差は 5 [%-points]程度であった。

図 5 に提案プラントにおける PWR 寄与分の発電効率 η'_{PWR} を式(13)に基づいて LNG 寄与分の発電効率 η'_{LNG} [%] の関数として燃焼器入口圧力ケース毎に表す。ただしそれらは酸素製造・二酸化炭素回収の両方を実施する場合の値である。

図 5 提案プラントにおける各熱源寄与分の発電効率 (白点: $\eta'_{\text{LNG}} = \eta$ ・黒点: $\eta'_{\text{LNG}} = \eta'_{\text{PWR}} = \eta'$)

提案プラントにおける LNG 寄与分の発電効率 η'_{LNG} が従来プラントの発電効率 η に等しいとした場合、PWR 寄与分の発電効率 η'_{PWR} は、45.6～47.3 [%]の値を示した。 $\eta'_{\text{LNG}} = \eta'_{\text{PWR}}$ の場合は両者とも表 3 に示した η' に等しい値となる。いずれにしても 40 [%]以上の送電端効率は従来の原子力発電の効率と比較すると高いと言える。なお、 η'_{LNG} が 45 [%]の場合は、 η'_{PWR} の値は燃焼器入口圧力が 2.00 [MPa]のケースで 32.0 [%], 5.00 [MPa]のケースで 38.6 [%]であった。提案プラントにおける PWR 関連設備は現行の PWR 発電プラントよりも少ないと予想され、資本コストも抑えられることから、30 [%]台の発電効率でも経済的な原子力発電が実現する可能性は有ると考えられる。蒸気条件の低い PWR ならば安全対策の容易化や設計の簡素化による効果も期待したい。

4. 研究の今後の課題

今後の課題としては、より効率化を施した発電プラントの分析が挙げられる。今回は原子力の寄与を明瞭にするた

め単純なサイクルの純酸素燃焼ガスタービンを従来システムとして分析したが、その他のモデルでも多くのケースを分析する必要がある。閉サイクル型純酸素燃焼ガスタービンには、再熱サイクル、圧縮機を利用した作動流体の一部を再循環させるサイクル、回収した CO_2 の圧縮プロセスで発生する熱を活用するサイクル、などを採用することで発電効率の向上が確認されているが、原子炉を複合化した場合に原子力寄与分の発電効率が高まる可能性も残されている。また、本研究では図 5 に示したように提案プラントにおける PWR の寄与分の発電効率は LNG 寄与分の発電効率の関数として表したが、将来的には各熱源の寄与分の発電効率の算定方法を確立したいと考えている。

5. 研究のまとめ

本研究では効率的な原子力利用を目的として PWR を閉サイクル型純酸素燃焼 LNG ガスタービンと組み合わせた発電プラントを提案した。ヒートバランスモデルを構築し、プラントの主圧力毎に発電性能を評価した。従来プラントの送電端発電効率 η が 38.2~40.1 [%]であったのに対して、PWR を利用する提案プラントでは、プラント全体での送電端発電効率 η' は 40.7~42.7 [%]であった。提案プラントにおける PWR 寄与分の発電効率 η'_{PWR} は LNG 寄与分の発電効率 η'_{LNG} の関数として表したが、 $\eta'_{\text{LNG}} = \eta$ のときは 45.6~47.3 [%]、 $\eta'_{\text{LNG}} = \eta'$ のときは 40.7~42.7 [%]の値を示し、従来の原子力発電よりも高効率であると見なすことができた。この結果は、純酸素燃焼ガスタービンの酸素製造動力や二酸化炭素回収動力の削減によるところが大きいと考えられる。

参考文献

1) 山田勝重; 大型焼却場から火力発電プラントへの熱供給, 平成 17 年度火力原子力発電大会論文集, (2005).

- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構; バイオマス等の高度利用火力発電システムの事業適合性に関する調査成果報告書, (2007).
- 3) 大島寛司, 内山洋司; 火力原子力複合型発電システムの概念設計, 第 24 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, (2008).
- 4) Olav Bolland, Hanne M. Kvamsdal, John C. Boden, A COMPARISON OF THE EFFICIENCIES OF THE OXY-FUEL POWER CYCLES WATER-CYCLE, GRANZ-CYCLE AND MATIANT-CYCLE, Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations, Vol. 1, (2005), pp. 499-512.
- 5) Evangelos Tzimas, Arnaud Mercier, Calin-Cristian Cormos, Stathis D. Peteves; Trade-off in emissions of acid gas pollutants and of carbon dioxide in fossil fuel power plants with carbon capture, Energy Policy, 35, (2007), 3991-3998.
- 6) 本藤祐樹, 内山洋司; 火力発電プラントの環境対策コスト分析, 電力中央研究所報告, Y92009 (1992).
- 7) 白井裕三, 原三郎, 幸田栄一, 渡邊裕章, 吉葉史彦, 犬丸淳, 布川信, 牧野尚夫, 三巻利夫, 阿部俊夫; CO_2 回収型高効率石炭ガス化複合発電システムの提案とその課題, 電力中央研究所報告, M07003 (2007).
- 8) 電力中央研究所; 二酸化炭素回収対応クローズド型高効率ガスタービン技術第 I 期研究開発 平成 13 年度成果報告書, (2002).
- 9) 朴炳植; 火力発電所中圧蒸気活用 CO_2 回収 NO_x フリー・リパワリングシステムの特性と経済性評価, 電気学会論文誌 B, 123, 7, (2005), 808-813.
- 10) Chenhua Gou, Ruixian Cas, Hui Hong; A novel hybrid oxy-fuel power cycle utilizing solar thermal energy, Energy, 32, (2007), 1707-1714.