

■ 研究論文 ■

ガスタービンを用いた原子力コジェネシステム

Nuclear Power Cogeneration Systems Using Gas Turbine

文 沢 元 雄*・緒 方 寛**・山 田 誠 也***

Motoo Fumizawa Kan Ogata Seiya Yamada

(原稿受付日1996年11月7日, 受理日1997年4月15日)

Abstract

The nuclear power cogeneration plant (NPCP) releases small amount of carbon dioxide than the conventional fossil power plant to generate the unit electrical power. Thus, the NPCP is expected to contribute resolving the ecological problems. It is important to investigate the nuclear power cogeneration systems using gas turbine from the view point to produce both electricity and products by nuclear heat of high temperature energy with high thermal efficiency. We evaluated overall efficiency of cogeneration systems using nuclear heat in the range of 50 to 800 °C released from gas turbine process. As a result, it was clarified that overall efficiency of the direct regenerative cycle was the highest in low temperature region below 200°C, and that of the direct regenerative inter cooling cycle was the highest in middle and high temperature region.

Keywords : Cogeneration, Gas Turbine, Carbon Dioxide, Cycle Efficiency, Nuclear Heat Application, Regenerative Cycle, Intercooling Cycle

1. はじめに

地球環境を保全するために二酸化炭素(CO₂)放出量を削減することは国家的社会的要請である。地球環境保全, エネルギーの安定供給, 及び省エネルギーの相互両立を図るためには, 図-1に示すように, 原子力熱エネルギーを用いてCO₂放出量の削減を行いつつ, クリーンエネルギーの生成, 化石燃料の改質, 熱効率の向上を図ることが効果的である。原子力発電プラントは, 化石燃料火力発電プラントに比べ単位発電量当たりの二酸化炭素の排出量が極めて少なく, 環境問題の解決に大きく寄与できるものと期待されているが, 一方で, 大量の温排水を排出する等全く環境に影響を与えないというわけではない。大量の温排水を減らすには, 発電効率を上げることや余剰の原子力熱エネルギーを利用して総合熱効率を上げることが考えられる^{1), 2), 3)}。本研究では, 原子力発電プラントにおける

総合熱効率向上の観点から, 高温ガス炉及びヘリウムガスタービンサイクルによる発電と同時に発電以外の余剰の原子力熱エネルギーを利用して製品(メタノールなど)を製造する方法(即ちコジェネ)について検討を行った。検討内容は, 候補となるガスタービンサイクルの選定を行い, 次いで, それらの候補サイクルによるコジェネシステムの総合熱効率を評価し, 熱利用温度レベルに応じた有利なガスタービンサイクルの分類を行った。

2. ヘリウムガスタービンサイクル

2.1 候補サイクル

直接サイクルと間接サイクルとに大別し, それぞれ

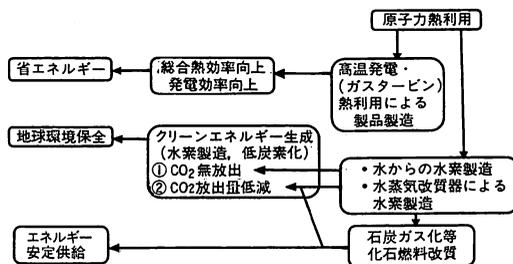


図-1 省エネルギー, 地球環境保全等に効果的な原子力熱利用の概念

* 日本原子力研究所 核熱利用研究部副主任研究員
〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

** 三菱重工業(株)長崎研究所主任
〒851-03 長崎市深堀町 5 丁目 717-1

*** 三菱重工業(株)長崎造船所計画主任
〒850-91 長崎市飽の浦町 1-1

に対し基本となるブレイトンサイクルとして再生サイクル、再熱サイクル、中間冷却サイクルを取り上げた。発電効率の点では直接サイクルが有利なこと、系統構成でも直接サイクルが簡素であること、経済性の面でも直接サイクルの優位性が予想されるが、安全性、メンテナンス性の点では間接サイクルが優位であると考えられる。また、再熱サイクル、中間冷却サイクルは単独でシステムを構成しても発電効率の向上は期待出来ず、再生サイクルと組み合わせたシステム、あるいは3サイクルを組み合わせたシステムにおいて効率向上の可能性はある。

複数のサイクルの中から、4種類の候補サイクルを選出した。各サイクルの構成を図2～図5に示す。各サイクルの比較を表1に示すが、その特徴は以下のとおりである。直接・再生サイクルは系統構成が単純で経済性の面で有利なシステムであること、直接・再生・中間冷却サイクルは最も高い発電効率が予測されるシステムであること、間接・再生・中間冷却サイクルは系統が複雑となるがメンテナンスの面で有利なシステムであること、間接・再生・再熱・中間冷却サイクルは最も複雑なシステムであるが間接サイクルの中で最も高い発電効率が予測されることが選出理由である。

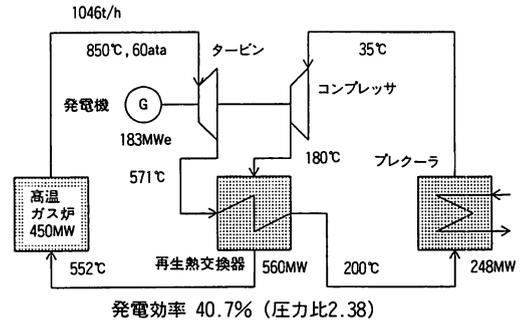


図-2 直接・再生サイクルの構成

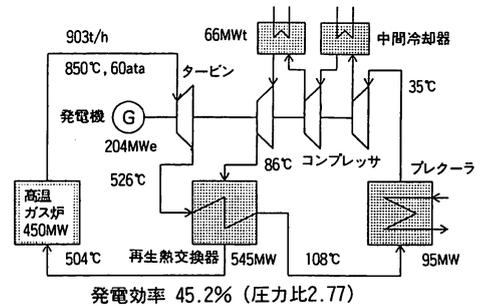


図-3 直接・再生・中間冷却サイクルの構成

表1 候補サイクルの特徴

	直接サイクル		間接サイクル	
	再生サイクル	再生・中間冷却サイクル	再生・中間冷却サイクル	再生・再熱・中間冷却サイクル
発電効率 (圧力比)	40.7% (2.38)	45.2% (2.77)	41.5% (2.89)	44.4% (3.78)
順位	4	1	3	2
経済性 (発電単価)	42.4mills/kWh	39.7mills/kWh	48.4mills/kWh	49.5mills/kWh
順位	2	1	3	4
技術レベル	①被覆燃料粒子ZrC層の開発必要 ②通常運転時燃料温度高い為、強制冷却喪失時メタルの温度高くなる ③原子炉入口温度高い為、炉容器冷却対策必要 ④1次系内にターボマシン設置されるのでタービンミサイルに対する評価必要 ⑤プレートアウトに対するターボマシンの保守、補修につき検討必要		①被覆燃料粒子ZrC層の開発必要 ②通常運転時燃料温度直接サイクルよりも高い為、強制冷却喪失時メタル温度より高くなる ③原子炉入口温度直接サイクルよりも高い為、炉容器冷却対策必要大 ④1次系内にターボマシン設置されるのでタービンミサイルによる安全機能の喪失無し ⑤1次系外にターボマシン設置されるのでターボマシンの保守容易	
将来性	長期的視点において直接サイクル有力 ・被覆燃料粒子の性能向上によるプレートアウト放射能量低減 ・サイクル効率の更なる向上 ・経済性の向上		短期的視点において間接サイクル有力 ・タービン系の保守性良	
最適サイクル	長期的視点において直接・再生・中間冷却		短期的視点において間接・再生・中間冷却	

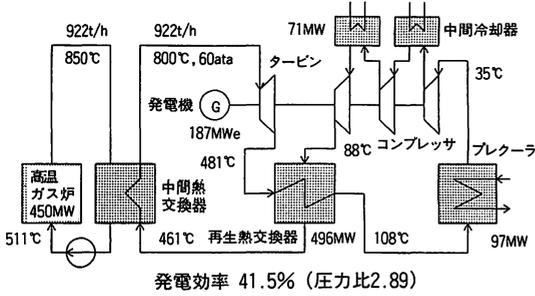


図-4 間接・再生・中間冷却サイクルの構成

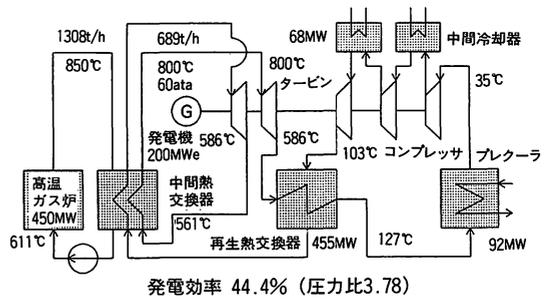


図-5 間接・再生・再熱・中間冷却サイクルの構成

2.2 候補サイクルの発電効率

評価に用いた原子力コジェネプラントの主要諸元はGA社の設計⁴⁾を参考にして以下のとおり定めた。

- ・原子炉熱出力 : 450MWt
- ・炉心出口温度 : 850°C
- ・コンプレッサー入口温度 : 35°C
- ・タービン入口圧力 : 60ata
- ・タービン効率 : 92%
- ・コンプレッサー効率 : 88%
- ・メカニカルロス : 2.5%
- ・冷却損失 : 1.0%
- ・再生熱交換器の温度効率 : 95%
- ・発電機効率 : 98%
- ・熱利用温度範囲 : 50~800°C

前述の候補サイクルの最適圧力比におけるガスタービンの発電効率（以降発電効率と略す。）を求める。直接・再生サイクルにおける発電効率と圧力比の関係を図-6に示す。熱利用温度レベルを50~100°Cに設定した場合に、圧力比が2.38において発電効率は40.7%（最大値）となる。図-2~図-5に最適圧力比における候補サイクルの熱物質収支及び発電効率を示す。直接・

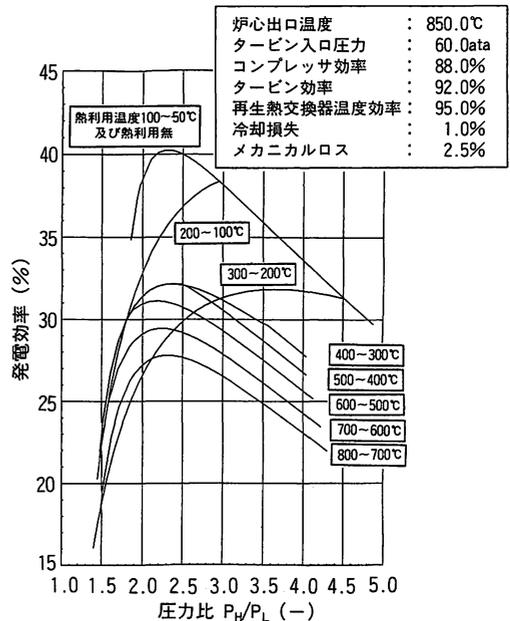


図-6 直接・再生サイクルの発電効率と圧力比の関係

再生・中間冷却サイクルが最も高く45.2%，以下間接・再生・再熱・中間冷却サイクルで44.4%，間接・再生・中間冷却サイクルで41.5%，直接・再生サイクルで

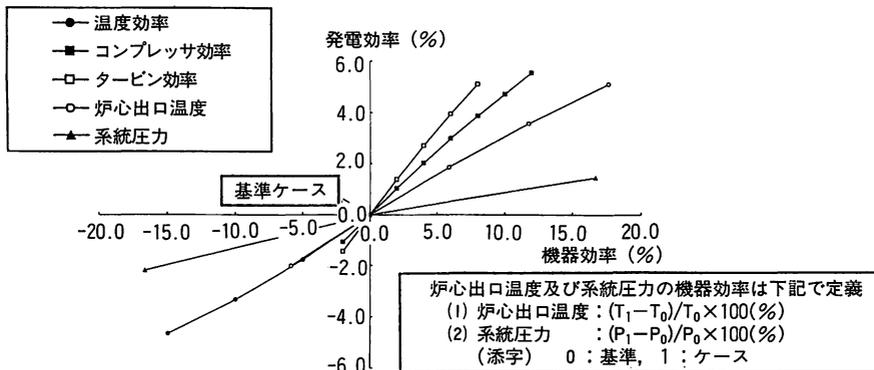


図-7 直接・再生サイクルの発電効率に対する各機器効率の影響

40.7%の順となる。直接・再生サイクルにおける各機器効率が発電効率に及ぼす影響を図-7に示す。ここで、各機器効率は（再生熱交換器の）温度効率、コンプレッサ効率、タービン効率、炉心出口温度、系統圧力である。直接・再生サイクル以外の3種類のサイクルにおいて、各機器効率が発電効率に及ぼす影響は直接・再生サイクルの場合と同様な傾向を示した。

3. 原子力コジェネシステム

3.1 熱利用温度レベルと総合熱効率

選定した各候補サイクルにおいて、コジェネシステムとしての熱利用温度をパラメータとしたガスタービンの発電効率並びに供給可能な熱量の検討を行い、原子力コジェネシステムとしての総合熱効率の評価を行った。

コジェネシステムの検討においては熱利用システムを含めたシステム全体の最適化が必要であるが、高温ガス炉の出口温度が850℃～950℃であることから、50℃～800℃の間で100℃毎の温度領域に対し熱エネルギーを供給した場合のガスタービンの発電効率及び供給可能熱量を求める手法をとった。このときの熱利用システムへの熱エネルギーの取り出しは熱供給用熱交換器を介して行うものとし出入口温度は熱利用温度レベル

+50℃とした。例えば、熱利用温度レベルが600℃から700℃の場合、熱供給用熱交換器の出入口温度は650℃/750℃となる。また、各熱利用温度レベルに応じて熱交換器の設置位置を変化させた。図-8～図-11に各熱利用温度レベルにおける直接・再生サイクルのシステム系統図を示す。直接・再生サイクルでは150℃～350℃の温度領域が排熱となっている。そこで、50℃～300℃の温度領域への熱供給は再生熱交換器とプレクーラーの間に熱供給用熱交換器を配置して行う。また、700℃～800℃の温度領域では、炉心出口温度が850℃であることから、炉心とガスタービンの間に熱供給用熱交換器を配置する。600℃～700℃の温度領域では、タービンを2段としその間に熱交換器を配置する。また、300℃～600℃の温度領域では、再生熱交換器を2段化しその間に熱供給用熱交換器を配置することによりシステムの排熱の減少及び熱回収の増加を図っている。

直接・再生サイクルにおける熱利用温度レベルと発電効率の関係を図-6に示す。熱利用温度50℃～100℃では、プレクーラーの排熱を供給できるため発電効率の低下はない。しかし、熱利用温度の上昇とともに発電効率は低下し、熱利用温度200℃～300℃の発電効率は31.8%となり、熱利用温度700℃～800℃では最小の

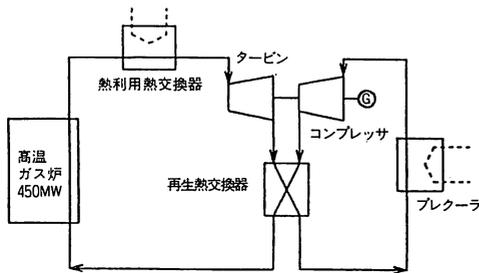


図-8 熱利用温度レベル（700-800℃）における直接・再生サイクルのシステム構成

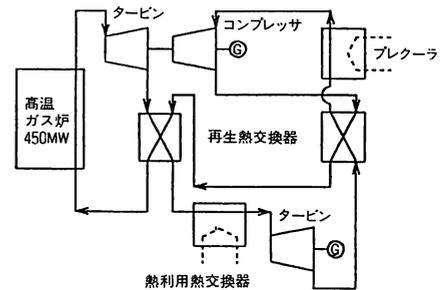


図-10 熱利用温度レベル（300-600℃）における直接・再生サイクルのシステム構成

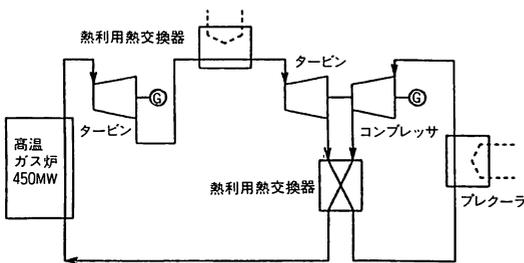


図-9 熱利用温度レベル（600-700℃）における直接・再生サイクルのシステム構成

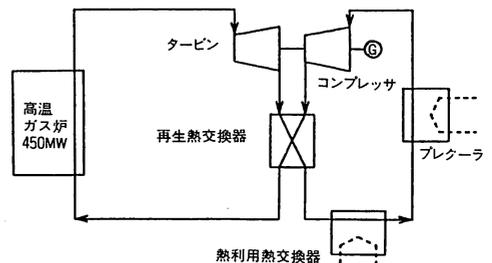


図-11 熱利用温度レベル（50-300℃）における直接・再生サイクルのシステム構成

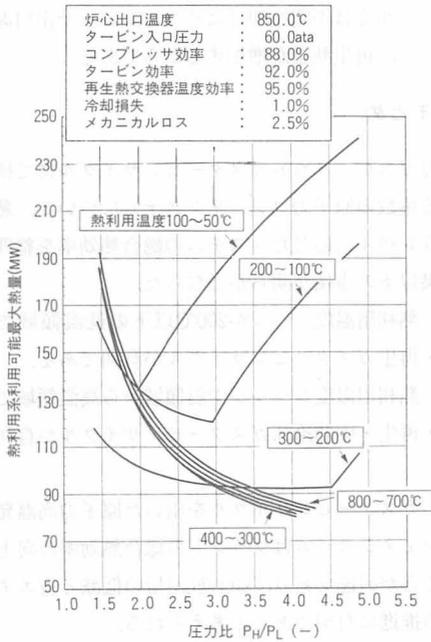


図-12 直接・再生サイクルの熱利用系利用可能最大熱量と熱利用温度レベルの関係

27.8%となる。熱利用温度300°C~700°Cでは発電効率は熱利用温度の低下に伴って高くなるがこれは熱供給用熱交換器の後流にタービンを配置したこと、再生熱交換器を2段階化したことにより排熱の減少及び回収熱量の増加を図ったためである。熱利用温度レベルと供給可能熱量の関係を図-12に示す。熱利用温度100°C~300°Cでは圧力比、発電効率の増加に伴い供給熱量が

減少し、発電効率の減少と共に供給熱量が増加する。300°C~800°Cでは圧力比の増加に伴い供給熱量が減少し、温度レベルの上昇、発電効率の低下に伴い供給可能熱量は増加する。同図で熱利用温度レベルが300°C以下の領域に対して300°C以上の領域での特性が異なる理由は以下のとおりである。熱利用温度レベルが300°C以下の領域では、再生熱交換器の低圧側ヘリウムガスを熱利用熱交換器に導くことで熱利用システムへ熱エネルギーを回収することが可能である。この時、圧力比の上昇に伴いコンプレッサで圧縮され、再生熱交換器で加熱され原子炉へ戻るヘリウムガス温度が低くなる。本研究では、原子炉出力を一定として考えているので、系統の循環流量は減少し交換熱量も減少する。圧力比がある値以上では再生熱交換器の出口のヘリウムガス温度が所定の温度以上となるので、圧力比の上昇に伴いヘリウムガス量は減少するが、熱交換器の出入口温度差が増大するので熱利用系利用可能最大熱量は増加する。一方、熱利用温度レベルが300°C以上の領域では、タービン膨張後の排ガスを再生熱交換器を経由して熱利用熱交換器に導くことはできないので、直接、タービンの排ガスを熱利用熱交換器に導くか、タービンでの膨張過程の途中で抽気して比較的高温状態の排ガスを熱利用熱交換器に導く必要がある。熱利用温度領域に応じて比較的高効率を得るために種々の系統構成を設定しているが、いずれの系統においても熱利用熱交換器の出入口温度は一定値として圧力比を変化させ熱利用熱交換器での熱交換量を求めた。この場合、圧力比の上昇に伴い原子炉入口温度が低くな

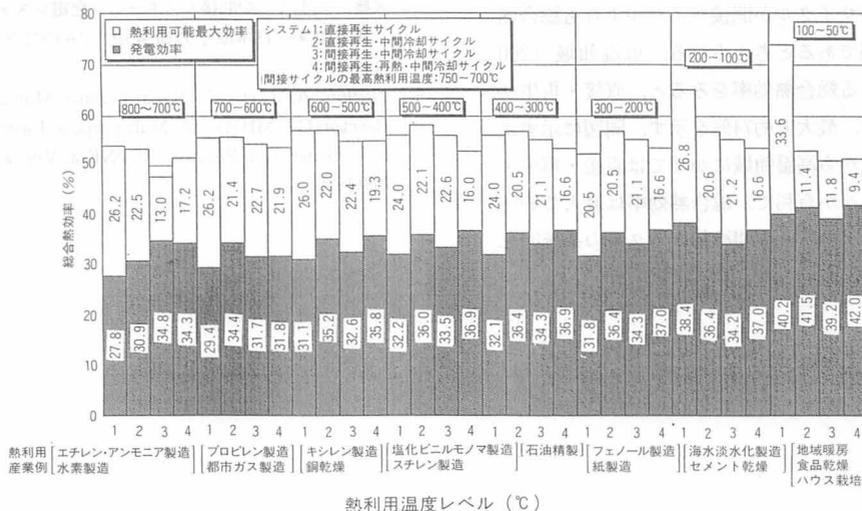


図-13 総合熱効率と熱利用温度レベルの関係

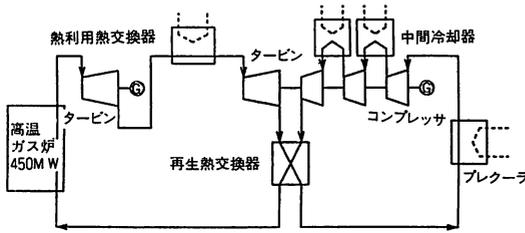


図-14 熱利用温度レベル (400-700°C) における直接・再生・中間冷却サイクルのシステム構成

りシステムの循環流量が減少するので、熱利用系利用可能最大熱量は減少する。

発電効率最大となる最適圧力比におけるシステムの総合熱効率を図-13に示す。同図には他の候補サイクルの総合熱効率も熱利用温度レベル毎に示している、尚、総合熱効率は以下のように定義した。

総合熱効率 = 発電効率 + 熱利用可能最大効率

ここで、熱利用可能最大効率 = 供給可能熱量 / 原子炉熱出力

熱交換器の伝熱性能の予備的検討の結果、間接サイクルでは、炉心出口ヘリウムガス温度850°Cに対し中間熱交換器の出口ヘリウムガス温度を800°Cと設定した。これは、直接サイクルにおいて原子炉出口ヘリウムガス温度を800°Cと設定することと等価である。原子炉出口ヘリウムガス温度はタービン入口ヘリウムガス温度となるが、ガスタービンサイクルではタービン入口温度が高いほどサイクルの熱効率は高くなるので、間接サイクルでは、直接サイクルよりも熱効率は低くなる。したがって、図-13では熱利用温度レベルの全般に渡って直接サイクルが間接サイクルよりも総合熱効率の点で有利であると考えられる。低温領域 (200°C以下) における総合熱効率をみると、直接・再生サイクルが有利で、最大で約74%を示す。同図に示すように、中温領域から高温領域にかけては直接・再生・中間冷却サイクルが有利で、総合熱効率は最大で約58%となる。直接・再生・中間冷却サイクルの系統図を

図-14に示すが、総合熱効率は最大となる理由は、このサイクルでは中間冷却によりコンプレッサ出口温度が低下し、再生熱量が増加するからである。

4. まとめ

高温ガス炉ヘリウムガスタービンサイクルにて構成される複数の原子力コージェネシステムについて、熱利用温度レベルに応じたシステムの総合熱効率を整理した結果以下の事項が明らかとなった。

(1) 熱利用温度レベルが200°C以下の低温領域では直接・再生ガスタービンサイクルが有利である。

(2) 熱利用温度レベルが中温領域から高温領域では直接・再生・中間冷却ガスタービンサイクルが有利である。

(3) ガスタービンサイクルを用いた原子力高温発電のコージェネシステムはプラントの総合熱効率の向上を図ることが可能であり、CO₂放出量の低減と省エネルギーの推進に有望であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるに当たり有益なご助言を頂いた千葉大学工学部の菱田誠教授並びに日本原子力研究所の小川益郎氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐野川, “高温ガス炉による高効率発電, (I) 高温ヘリウムガスタービンによる発電”, 原子力誌, 35, pp. 70-74 (1993).
- 2) 佐野川, “高温ガス炉による高効率発電, (II) 高温ヘリウムガスタービンと蒸気タービンの複合サイクルによる発電”, 原子力誌, 35, pp. 139-146 (1993).
- 3) 武藤, “高温ガス炉間接ガスタービン発電システムのサイクル熱効率”, 日本原子力研究所, JAERI-Tech96-006, (1996).
- 4) Neylan, A. J. et. al., “Gas Turbine Module Helium Reactor (GT-MHR): A Multipurpose Passive Safety Next Generation Reactor”, ICONE-3, Vol. 2, pp. 751-759 (1995).