JAEA-Research
2018-004
DOI:10.11484/jaea-research-2018-004

高温ガス炉導入検討のための需要調査及び熱バランスの検討

Research on Demand of HTGR for Investigation of Introduction Scenario and Investigation on Heat Balance of HTGR

深谷 裕司　笠原 清司　水田 直紀　稲葉 良知
柴田 大受　西原 哲夫

Yuji FUKAYA, Seiji KASAHARA, Naoki MIZUTA, Yoshitomo INABA
Taiju SHIBATA and Tetsuo NISHIHARA

原子力科学研究部門
高温ガス炉水素・熱利用研究センター
小型高温ガス炉研究開発ディビジョン

Small-sized HTGR Research and Development Division
HTGR Hydrogen and Heat Application Research Center
Sector of Nuclear Science Research

June 2018

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2018

JAEA-Research 2018-004

高温ガス炉導入検討のための需要調査及び熱バランスの検討

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門　高温ガス炉水素・熱利用研究センター
小型高温ガス炉研究開発ディビジョン

深谷　裕司、笠原　清司*、水田　直紀、稲葉　良知、柴田　大受、西原　哲夫

（2018 年 3 月 30 日　受理）

高温ガス炉導入検討のための需要調査及び熱バランスの検討を行った。はじめに、先行研究の需要調査に対する整理を行った。次に、高温ガス炉の商用炉設計である GTHTR300 の熱バランスとその特徴について調べ整理した。これらの情報を踏まえ、現在の日本の需要に見合う高温ガス炉導入基数を算出した。その結果、以下のような結果が得られた。

日本の代表的な製油所（製油容量 10-20 万 bbl/d）には基本設計から熱供量を倍増させた GTHTR300C-II が 1 基、最大級の水島（製油容量 40 万 bbl/d）には GTHTR300 と炉心出口温度 850℃で熱供給のみを行う GTHTR300Heat の組み合わせが 2 セット導入可能である。

エチレン製造には日本の代表的なコンビナートに炉心出口温度 950℃で熱供給のみを行う GTHTR300HeatII が 1 基、京葉コンビナートには 4 基程度導入が可能である。

パルプ紙製造には日本の生産の 1 割を占める富士市で排熱温度を 200℃まで高めた設計の GTHTR300HTW が 1 基導入可能である。

製鉄に関しては、GTHTR300C-II が日本全国で 140 基程度導入が可能である。

また、今後の研究の発展に備え、熱バランス評価コードの整備も行った。

大洗研究開発センター：〒311-1393　茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地
*水素利用研究開発ディビジョン

JAEA-Research 2018-004

Research on Demand of HTGR for Investigation of Introduction Scenario and Investigation on Heat Balance of HTGR

Yuji FUKAYA, Seiji KASAHARA*, Naoki MIZUTA, Yoshitomo INABA, Taiju SHIBATA and Tetsuo NISHIHARA

Small-sized HTGR Research and Development Division,
HTGR Hydrogen and Heat Application Research Center,
Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 30, 2018)

The demand of HTGR to investigate its introduction scenario and heat balance of HTGR were researched. First, previous studies of HTGR demand were reviewed. Next, heat balance of GTHTR300, a commercial scale HTGR design, and its characteristics were researched. By using this information, installation number of HTGR to meet the demand in Japan were evaluated. The result is as follows:

One unit of GTHTR300C-II, whose heat supply capacity is enhanced twice, can be installed to the representative petroleum purification plant in Japan, whose capacity is 1-2 hundred thousand bbl/d. Two set of GTHTR300 and GTHTR300Heat, which provides only heat by the reactor outlet temperature of 850℃, can be installed to Mizushima, which has the maximum capacity of 4 hundred thousand bbl/d.

One unit of GTHTR300HeatII, which provides only heat by the reactor outlet temperature of 950℃, can be installed to the representative industrial complex in Japan to produce ethylene. Four units of that can be installed to Keiyo industrial complex.

One unit of GTHTR300HTW, whose waste heat temperature is enhanced to 200℃, can be installed to Fuji city, where occupied 1/10 of capacity in Japan, to generate pulp and paper.

140 units of GTHTR300C-II can be installed in Japan to generate steel.

In addition, heat balance evaluation code was developed in this study.

Keywords: HTGR, Demand, Heat Balance

*Hydrogen Application Research and Development Division

目　次

1. 背景および目的 ---------- 1
1.1 高温ガス炉の特徴と需要への期待 ---------- 2
1.2 高温ガス炉発電システムの特徴と熱利用 ---------- 3
1.3 高温ガス炉の需要調査および
高温ガス炉利用研究に関する先行研究の概要 ---------- 5
2. 熱バランスの検討及び需要調査 ---------- 7
2.1 GTHTR300 の熱バランスの検討 ---------- 7
2.2 GTHTR300 の排熱温度を高くした場合の熱バランス ---------- 8
2.3 需要調査に用いる GTHTR300 の炉型と諸元 ---------- 9
2.4 日本のエネルギー需要 ---------- 9
2.5 需要地を想定した検討 ---------- 10
3. まとめ ---------- 14
謝辞 ---------- 15
参考文献 ---------- 16
付録 A. 高温ガス炉の需要調査に関する先行研究と熱利用研究の変遷 ---------- 19
付録 B. 熱バランス評価コードの整備 ---------- 28

Contents

1. Background and Objective ---------- 1
1.1 Characteristics of HTGR and Expectation for Demand ---------- 2
1.2 Characteristics of HTGR Electricity Generation System and Heat Utilization ---------- 3
1.3 Overview of Previous Studies for Demand Investigation for HTGR and Utilization of HTGR ---------- 5
2. Investigation on Heat Balance and Demand ---------- 7
2.1 Investigation on Heat Balance of GTHTR300 ---------- 7
2.2 Investigation on Heat Balance of GTHTR300 with High Temperature Waste Heat ---------- 8
2.3 Specifications of Reactor Types of GTHTR300 for Demand Investigation ---------- 9
2.4 Energy Demand in Japan ---------- 9
2.5 Investigation with Area of Demand ---------- 10
3. Summary ---------- 14
Acknowledgements ---------- 15
References ---------- 16
Appendix A Transition of Previous Studies for Demand Investigation for HTGR and Utilization of HTGR ---------- 19
Appendix B Development of Heat Balance Evaluation Code ---------- 28

図リスト

Fig. 1.1 Example of multi-purpose utilization of HTGR ---------- 1
Fig. 1.2 Result of loss of forced cooling experiment of HTTR ---------- 2
Fig. 1.3 Schematic diagram of gas turbine system of HTGR ---------- 3
Fig. 1.4 Economy of electricity generation ---------- 3
Fig. 1.5 Heat balance of GTHTR300 ---------- 4
Fig. 2.1 Heat balance of GTHTR300C ---------- 7
Fig. 2.2 Heat balance of GTHTR300C-II ---------- 8

表リスト

Table 2.1 Electricity and heat generation of GTHTR300 series ---------- 9
Table 2.2 Energy supply from energy conversion division (PJ/y) ---------- 10
Table 2.3 Energy demand for manufacture division (PJ/y) ---------- 10
Table 2.4 Petroleum purification capacity in Japan ---------- 11
Table 2.5 Specification of petroleum purification plant with HTGR ---------- 11
Table 2.6 Ethylene generation capacity of industrial complexes ---------- 12
Table 2.7 Specification of ethylene generation plant with HTGR ---------- 12
Table 2.8 Steelmaking capacity
and installation number of GTHTR300C-II ---------- 13

This is a blank page.

1. 背景および目的

これまで、高温ガス炉は 900℃に及ぶ熱利用が可能である特性から、電力だけではなく熱利用を目的とした多目的利用の研究 [1]が行われてきた。（Fig. 1.1）しかし、高温ガス炉の特性を活かし、軽水炉等、他の炉型と差別化できる分野への導入が主に検討されてきた経緯があり、その用途も水素製造、製鉄、海水淡水化等の特定の用途に重点がおかれていた。

一方で、2011 年 3 月に発生した東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所事故（以降、東京電力福島原発事故と呼称）を契機に、高温ガス炉の持つ高い安全性が注目され、エネルギー基本計画、経済財政運営と改革の基本方針 2014（骨太の方針）、「日本再興戦略」改訂 2016－第 4 次産業革命に向けて－（新・成長戦略）、等の閣議決定において、エネルギー政策にも、軽水炉より安全な発電用原子炉として組み込まれつつある。現在、産学官で高温ガス炉協議会を設置し、高温ガス炉の本格的な実用化について議論を進めている。その結果として、高温ガス炉の開発を積極的に進めているポーランドへ導入する高温ガス炉技術として、日本の技術が最有力視される状況にあり、2017 年 5 月に「2017 年から 2020 年までの日本国政府とポーランド共和国政府との間の戦略的パートナーシップの実施のための行動計画」が外相会議において、両外相により署名されるに至っている [2]。ポーランドにて開発された高温ガス炉技術は日本への輸入も期待できる。

高温ガス炉は冷却材喪失時においても燃料溶融に至らない高い安全性を有しており、東京電力福島第一原子力発電所事故の様な状況にあっても燃料溶融には至らない固有の安全性を有する。この固有の安全性により可能となる近接立地、900℃に及ぶ高温の利用、高い経済性などの高温ガス炉特有の特徴を活かせる、現状の状況に則した利用を再検討すれば、更なるエネルギー需要に応えることができるはずである。

この観点から、本研究は、これまでの高温ガス炉及び熱利用に関する先行研究の調査、及び現在の国内の需要調査を行い、今後の高温ガス炉導入シナリオ検討に資することを目的とする。

なお、本研究は株式会社 東芝 原子力事業部との共同研究の一環として行われたものを含む。

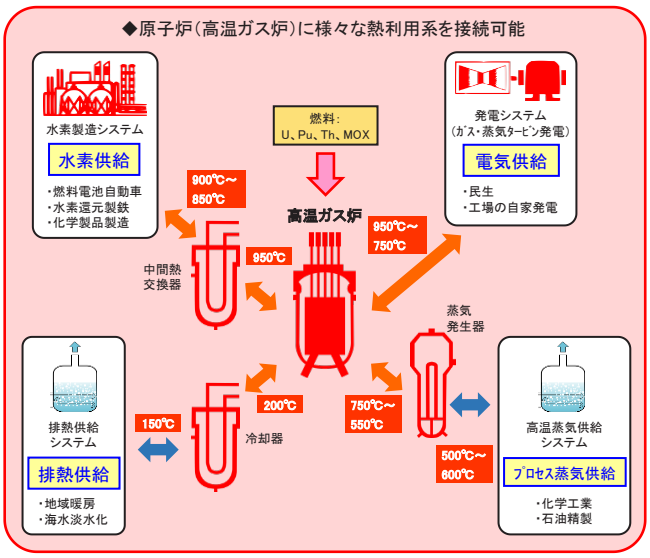


Fig. 1.1 Example of multi-purpose utilization of HTGR[1]

1.1 高温ガス炉の特徴と需要への期待

冒頭で述べたように、高温ガス炉は高い安全性により、軽水炉より安全な発電用原子炉として注目を浴びている。東京電力福島原発事故では、軽水炉の炉心冷却機能の安全性が問題となり、被覆管でのジルカロイ・水反応による水素発生、水素爆発、燃料の溶融、環境への放射性物質の放出と至る結果となった。一方で、高温ガス炉は炉内構造物及び燃料材料に用いられる黒鉛構造物の高い熱伝導率による効率的な伝熱、輻射熱伝達を介し、炉外へ受動的機構のみで安全に除熱が行える特徴を有している。また、熱中性子炉の特徴である核的自己制御性も備えており、出力の上昇に対し自然に出力を抑制する機能が働く。この安全性は実際に、日本原子力研究開発機構が管理する高温工学試験研究炉（HTTR）でも、安全性実証試験により確認されている。30%出力にて炉心運転中に一次系ヘリウム冷却材の流れをガス循環機の運転を停止することにより完全に止める、循環機停止試験 [3]が行われ確認されている。これは、東京電力福島原発事故で発生した外部電力の喪失と同等の事象である。なお、東京電力福島原発事故では、制御棒が動作し炉心停止に至ったが、この試験では制御棒が動作しなかったことを想定し、より過酷な状況を模擬したものとなっている。

Fig.1.2 にその結果を示す [4]。循環機停止と共に、冷却材流量が完全に喪失する。それと同時に燃料温度がわずかに上昇する。この時点で、ドップラー効果と呼ばれる、^{238}U（ウラン 238）の中性子吸収の増加により、炉心は未臨界となり自然に炉心は停止する。炉心内の熱及び崩壊熱の除熱が冷却材停止後も原子炉圧力容器の外側に輻射により行われるため、燃料温度は緩やかに上昇するものの、制限温度を超えることがなく炉心の健全性が保たれる。東京電力福島原発事故でも非常用復水器が正常に運用できていれば、最悪の事態は免れたといわれているが、高温ガス炉では、このような、人の操作を一切必要としない受動的な自然現象のみで炉心の健全性が保たれる高い安全性を持つ。このように、高温ガス炉の高い安全性を考慮すれば近接立地による需要への対応も期待できる。

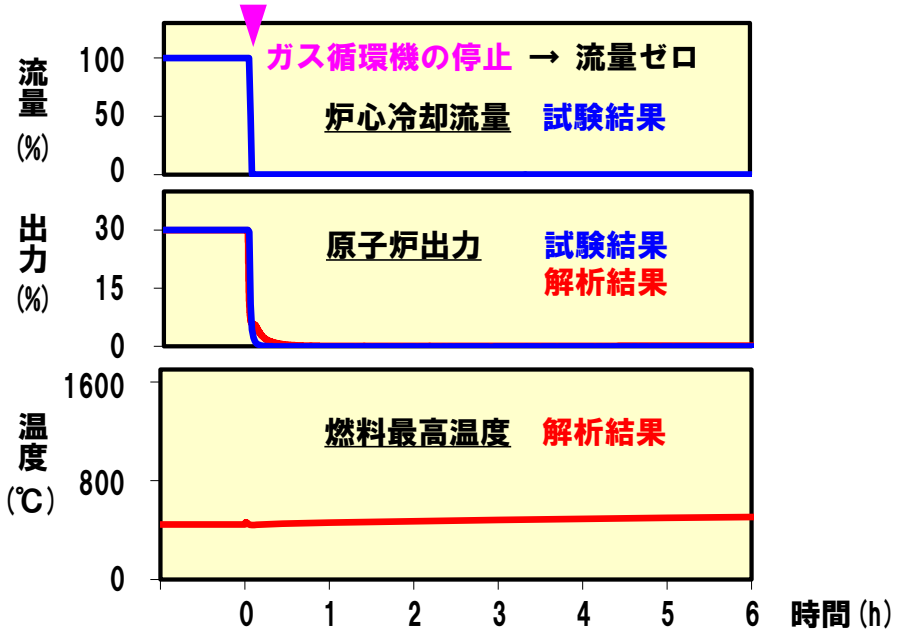


Fig.1.2 Result of loss of forced cooling experiment of HTTR[4]

1.2　高温ガス炉発電システムの特徴と熱利用

Fig. 1.3 に高温ガス炉の発電システムの構成[4)]を示す。これは、GTHTR300 シリーズと呼ばれる商用発電炉の設計に関するものである。中間熱交換機は高温利用時の設計であり、発電に特化した原子炉では設置されず、原子炉で加熱された 850-950℃のヘリウムガスを直接タービンに流れ込み発電を行う。そのため、複雑な水・蒸気系を扱う軽水炉と異なり発電系が非常に単純化され、軽水炉で用いるような非常用冷却装置（ECCS）なども必要とせず、プラント全体の設備量が少なく、発電量あたりの建設費が少なくて済み、低い発電原価が実現できる。Fig. 1.4 に軽水炉と高温ガス炉の発電原価の比較を示した[4)]。簡素化されたシステムと高い安全性により高温ガス炉の発電原価は軽水炉と比較して約 3 割の 2.4 円/kWh 程度安価であるとの評価がなされている。

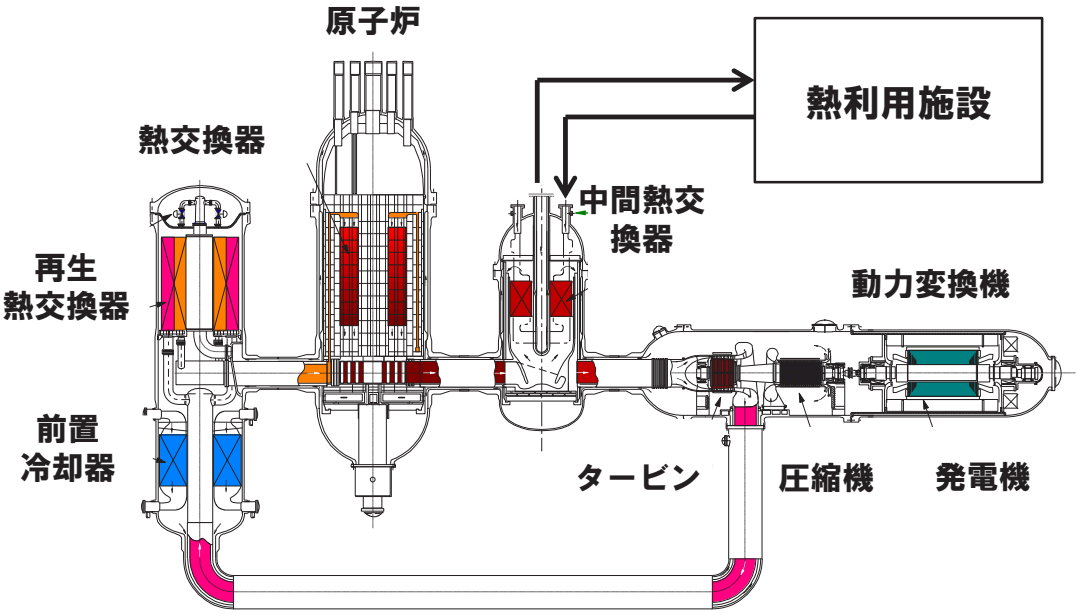


Fig. 1.3 Schematic diagram of gas turbine system of HTGR[4)]

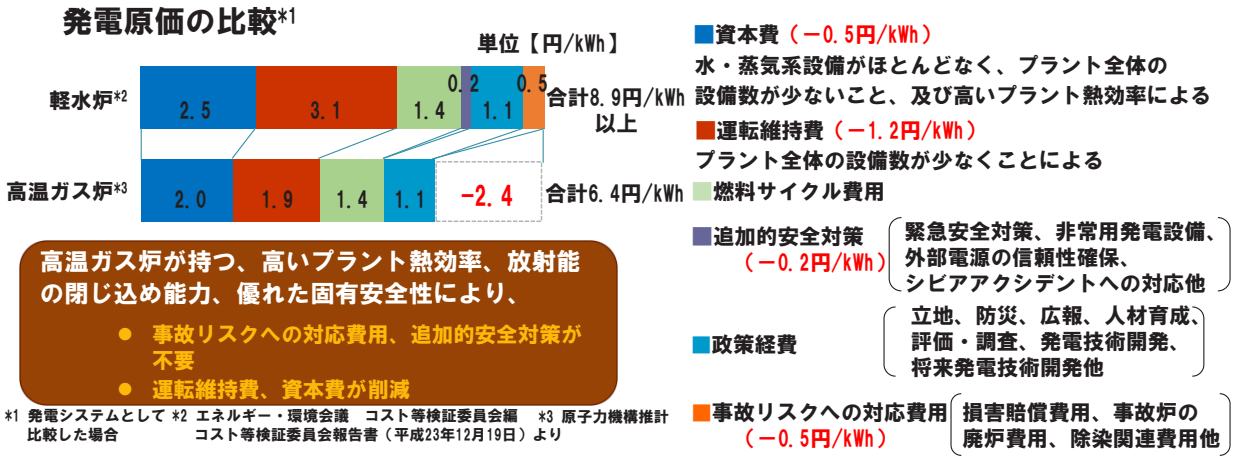


Fig. 1.4 Economy of electricity generation[4)]

システム内の熱エネルギーの移動と電気エネルギーへの変換に関しては、Fig.1.5 の熱バランスに示す。ただし、細かなリーク流などは割愛した。なお、図の熱バランス [5]は GTHTR300 の代表炉心のものであり、高温の熱利用を行わないタイプのものである。このような熱力学サイクルはブレイトンサイクルと呼ばれる。

原子炉に 587℃で侵入したヘリウムガスは原子炉の核熱により 850℃に上昇し、タービンに注ぎ込まれる。なお、高温を利用する場合には、流量を絞ることにより、同じ炉心出力でも 950℃までヘリウムガスを加熱し、原子炉とタービンの間に設けた中間熱交換器でその熱を取り出す。タービンと圧縮機の軸は機械的につながっており、タービンでのヘリウムガスの膨張による回転エネルギー（529.4MW）とそのエネルギーの一部を利用した圧縮機でのヘリウムガスの圧縮のエネルギー（250.6MW）の差（278.8MW）が発電機に伝えられ、電気エネルギーとして取り出される仕組みである。ヘリウムガスはガスタービンで膨張し圧力は約半分の 3.64MPa、温度は炉心入口温度と同程度の 618℃まで低下する。再生熱交換器及び前置冷却器で冷却され、最終的には 28℃まで冷却され、圧縮機に注入される。もし、この冷却を行わなければ、タービンで取り出した運動エネルギーと同程度のエネルギーが圧縮機で必要となってしまい発電が行えない。圧縮機にて圧縮されたヘリウムは圧力が再び圧縮前の 2 倍程度の 7.05MPa にまで回復し、同時に圧縮により 137℃まで温度が上昇する。さらに、再生熱交換器で加熱され、炉心入口には 587℃で戻る。ここで、再生熱交換器は必ずしも必要が無いものであるが、再生熱交換器の存在により、無駄な排熱が大幅に回避されていることが分かる。このような、排熱すべき熱の一部を利用し、加熱器（原子炉）入口の予熱に用いることにより加熱量を削減し効率を改善するサイクルを再生サイクルと呼ぶ。高温のヘリウム利用とこれらのサイクルの工夫により、発電効率は軽水炉の 35%程度より大幅に高い 46%程度（950℃出口温度利用時は 50%程度）の高い発電効率が得られる。残りの熱は前置冷却器の排熱として廃棄される。この排熱は温水として、高温ガス炉の運転条件に応じて 40-200℃程度まで [6]の利用が可能である。排熱も比較的高温であるため多様な排熱利用も期待できる。

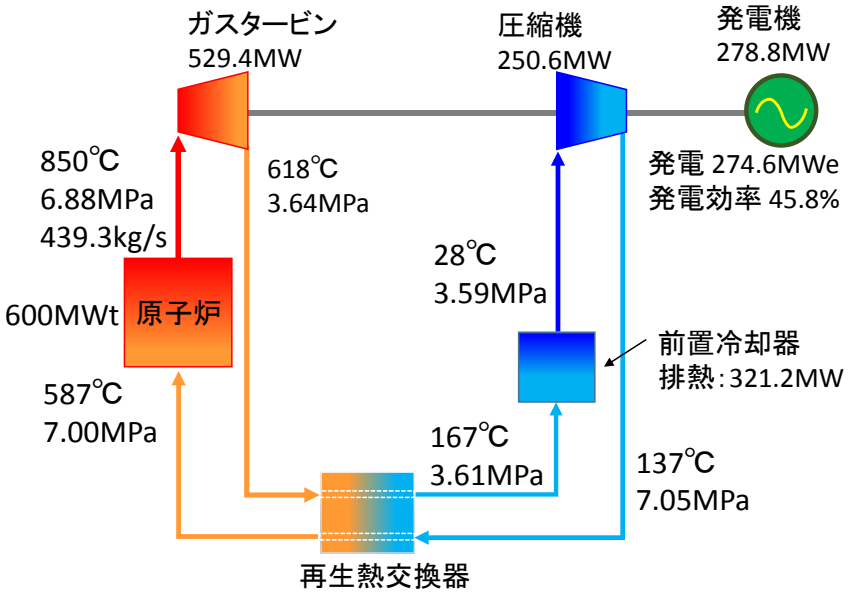


Fig.1.5 Heat balance of GTHTR300[5]

1.3 高温ガス炉の需要調査および高温ガス炉利用研究に関する先行研究の概要

ここでは、原子力機構におけるこれまでの高温ガス炉利用研究の概要を以下に示す。なお、詳細は付録 A に示す。

1995-1996 年に高温ガス炉熱利用の研究が精力的になされている。「核熱利用システムの構築に関する研究」と題した報告 [7]では、過去の核熱利用例及び、検討例が示されている。核熱利用の実績としては、紙パルプ工場などの工業用の蒸気供給、地域暖房、温室栽培などの農業利用、魚の養殖などの漁業利用である。利用検討に関しては、化学プラント、石油化学コンビナート、製鉄などである。核熱利用の実績に関しては、比較的低温もしくは排温の利用が多く、熱利用の検討に関しては、それに加え高温のプロセス蒸気を用いるもの、水素製造など新たな可能性が模索されていることが分かる。

「ガスタービンプロセスを用いた原子力コジェネシステムの予備検討」と題した報告 [8]では、発電の他に予測される熱利用に対して、熱利用の温度領域とサイクルの形態が比較検討されている。原子炉からの冷却材を直接タービンに供給する直接サイクルと、中間熱交換器を用い 2 次系冷却材をタービンに供給する間接サイクルがある。さらに、再生サイクル、再熱サイクル、中間冷却サイクルの併用など多くの組み合わせが検討されている。最終的な結論としては、熱利用量を原子炉出力で割った熱利用可能最大効率という指標を新たに定義し、これに発電効率を加えたものをシステム効率と定義し比較している。200℃以下の低温域では直接・再生サイクルが有利、中温高温域では直接・再生・中間冷却サイクルが有利との結論を出しているが、低温域の優位性や、中温高温域での差が少ないこと、システムが簡素化などを合わせれば、直接再生サイクルが万能と言える。

「核熱・石炭によるメタノール製造システム概念の検討」[9]では、世界中に豊富に存在する石炭資源利用における二酸化炭素削減を検討したものである。石炭の部分酸化法による一酸化炭素と核熱により生成された水素を反応させメタノールを合成するというものである。このとき必要となる水素の製造に核熱を用いる研究である。一酸化炭素を工業原料として用いる、独創的な発想であり、注目されるべき研究であるが、主な需要をメタノール自動車に設定したことが、研究の衰退につながったと思われる。なお、メタノール自動車は既に導入が開始されているが、衰退の一途をたどっている [10]。しかし、メタノール需要自体は伸びており、今後も需要の一つとして検討が続けられるべきである。

「核熱利用システムの現状と将来の動向」[11]における検討では、核エネルギーの持つ可能性を長期的な世界エネルギー需給において現実に利用可能なものとするために、熱電併給、原子力製鉄、水素製造、化石燃料の改質、炭酸ガスのメタノール等への回収固定、の 5 つの用途があげられている。特に、最後の炭酸ガスのメタノール等への回収固定に関しては、近年、回収技術が発達しても処分法が困難である二酸化炭素を有効に利用できる技術であり、今後の導入が期待できる。

「核熱利用システム構築に必要な基礎検討」[12]では、「炭酸ガスを原料とした化学製品製造技術」についての検討がなされている。結論として、実用化されているプロセスとしては、メタノール製造（メタンからの製造）、尿素製造、将来の技術としては、エチレン製造（メタンを原料）が二酸化炭素を原料とするプロセスとして有効であり、これらのプロセスに高温ガス炉か

ら熱供給が行えるとしている。

「核熱による二酸化炭素の再利用システムの検討」[13]では二酸化炭素の排出量の多い火力発電を対象に回収した二酸化炭素を利用し、メタノール、尿素、エチレン及びガソリンを製造するプロセスが検討され、それぞれのプロセスに高温ガス炉の核熱を利用している。

最後に「核熱の産業利用に関する検討」[14]では、高温ガス炉を用いたコンビナート等への熱供給について検討がなされている。

1998 年には HTTR が初臨界を達成し[15]、その後、着実に運転実績を積み重ねている。次のステップとして 2000 年ごろから実用炉（商用炉）として GTHTR300 シリーズの設計研究が始まっている。商用炉設計が明確になると同時に、付随する技術も発展している。水素製造もそれまでメタンの水蒸気改質法が想定されていたが、IS プロセス[16]を想定するようになった。IS プロセスでは、硫酸の熱分解反応により酸素が発生し、ヨウ化水素の熱分解反応により水素が発生する。それぞれ、分解された硫酸とヨウ化水素は水を加えたブンゼン反応により復元され、再び熱分解に移行し酸素と水素を発生させる。この方法では、水蒸気改質法とは異なり、製造工程で二酸化炭素は発生しない。なお、この IS プロセスは 2016 年に日本原子力研究開発機構において、一般の工業材料のみを用いて製造した試験装置で毎時 10ℓの水素を 8 時間連続で製造することに成功[17]している。

水素製造を行う GTHTR300C は発電のみを行う GTHTR300 と比較し、運転パラメーターのみの変更で対応できる[18]ことを基本的な概念としており、新たに開発する要素は少ない。なお、熱利用側に倍程のエネルギーを取り出し、倍程度の水素製造が可能な GTHTR300C-II[19]とする設計もなされているがタービンの設計自体が異なる。

また、熱利用に関しては水素製造のほかに、製鉄[19]、海水淡水化[20]、融雪[6]に関しても検討がなされている。

一方で、高温ガス炉全体の導入検討についてもなされている。2008 年には日本原子力研究開発機構として、「2100 年原子力ビジョン」－低炭素社会への提言－[23,24]と題した、意見書を発表している。この提案の趣旨としては、原子力を活用することにより二酸化炭素排出の削減を図るものであり、IS プロセスによる水素製造等により、高温ガス炉も重要な役割を果たしている。この評価においては、商用発電の目的としては、軽水炉、資源論の観点から軽水炉をリプレースしながら導入される高速増殖炉、将来の導入が期待される核融合炉に限られ、高温ガス炉の用途は運輸・産業用の水素供給、化学プラント等への蒸気供給・自家発電に限られるが、それでも高温ガス炉は 2100 年には 120 基の導入が見込まれている。なお、自動車は 2100 年にはすべて、燃料電池車もしくは電気自動車に置き換わるものと推定している。しかし、東京電力福島原発事故以降、原子力に求められる安全に対する要求は強まり、発電用原子炉としても高温ガス炉の導入が期待されている。今後は、高温ガス炉の発電をベースとしたコジェネレーションに関しても検討されるべきである。

2. 熱バランスの検討及び需要調査

2.1 GTHTR300 の熱バランスの検討

様々な熱利用に対応するためには、必要とされる様々な温度範囲に対し適切な形での熱供給が必要となる。そのため、GTHTR300 シリーズの熱バランスに対する設計思想を確認し、最終的に、排熱利用のために排熱温度を 200℃まで上昇させた GTHTR300HTW を提案し、その熱バランスを評価した。なお、評価に関しては、汎用プロセス解析コードを開発し（付録 B 参照）使用した。

GTHTR300 シリーズには、基準となるガスタービンによる発電に特化した GTHTR300 の他に、発電効率 50%を達成できる GTHTR300+[19]、コジェネレーションを目的とした GTHTR300C[19]、その熱供給能力を倍増させた GTHTR300C-II[19]が存在する。設計自体は、コジェネレーションとして具体的に水素製造を想定しているが、本研究では水素製造以外の熱利用も想定する。また、文献 [18,19]によっては GTHTR300C を GTHTR300C-I、GTHTR300C-II を GTHTR300H と呼称しているが基本的に同じものである。

ここでは、熱利用を考え、GTHTR300C と GTHTR300C-II の設計を確認する。それぞれの熱バランスは Fig.2.1、Fig.2.2 に示す。

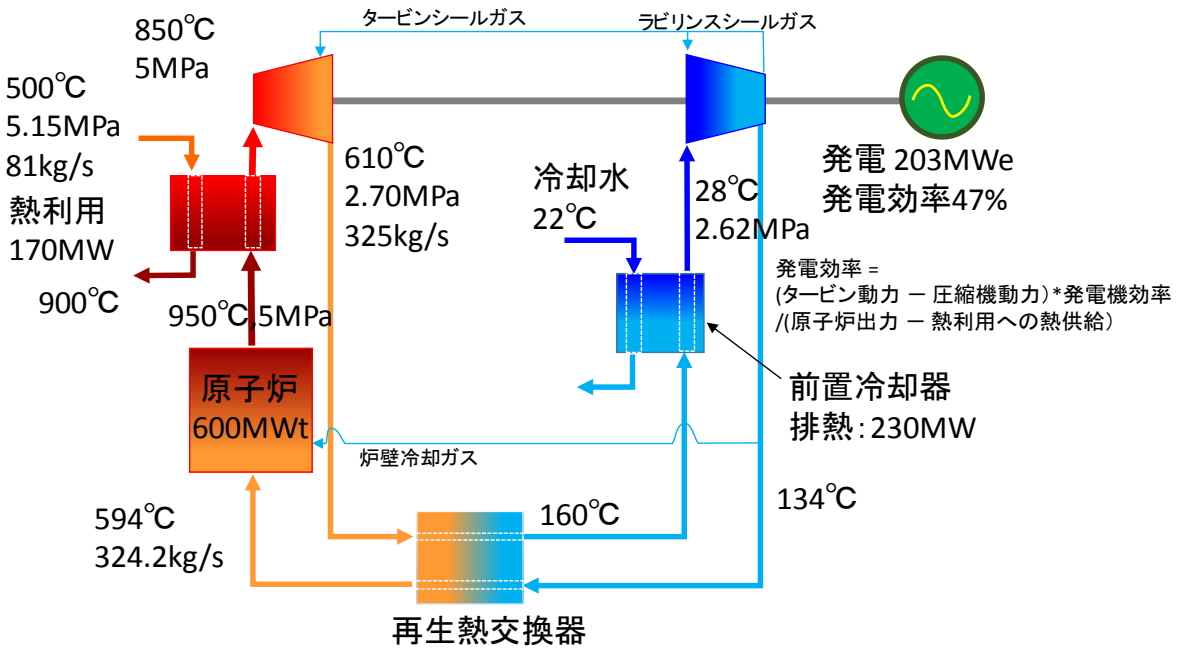


Fig. 2.1 Heat balance of GTHTR300C[21]

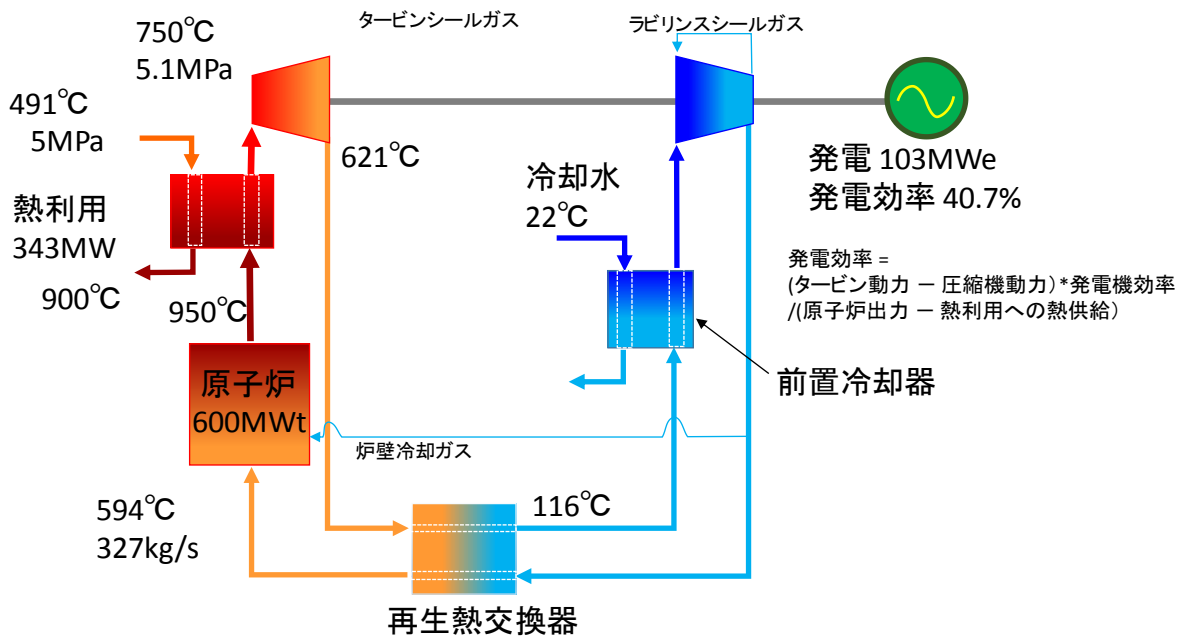


Fig. 2.2 Heat balance of GTHTR300C-II[19)]

GTHTR300 と GTHTR300C について中間熱交換器の下流はほぼ同じ温度条件である。GTHTR300C では、原子炉出口温度が 950℃と GTHTR300 と比較し 100℃程度高い温度であるが、中間熱交換器を通して、熱利用側に熱を供給することにより、タービン入口温度は GTHTR300 と同じ 850℃を保つ。そのため、熱利用側に供給した熱を除いた熱量を基準として求めた発電効率は 46%程度と同じ値が得られる。ただし、炉心入口温度も 600℃程度と同等であるため、GTHTR300C では同じ炉心出力で 100℃高い 950℃まで加熱する必要がある。そのため、冷却材流量を 3 割程度減らし、温度を高める工夫がなされている。それでも、中間熱交換器以降の温度条件は同等のため同等の発電効率が得られるが、この冷却材流量の低下の分、熱エネルギーの輸送量が落ち、発電量自体が 3 割低下していると理解できる。

GTHTR300C-II は熱利用側への熱を GTHTR300C の倍程度取り出す関係上、タービン入口温度は 750℃に下がってしまい、タービンの設計が異なる関係上、完全に、同じ特性の性能が再現しきれておらず、発電効率が若干下がり 41%程度となる。

2.2 GTHTR300 の排熱温度を高くした場合の熱バランス

GTHTR300 の排熱利用は 200℃まで利用可能[6)]とされているが、代表設計における前置冷却器のヘリウム側の入口温度は 167℃であり、設計変更しなければ 200℃の排熱利用はできない。当然、排熱を増やせば発電効率が低下するため、ここでは、その変化幅を確認する。なお、タービン、圧縮機の温度条件が変わらなければ、タービンの特性が大きく変わらないことは、GTHTR300 と GTHTR300C が同じタービン設計であり、運転パラメーターのみの変更で対応できる設計であることからも推測できる。そこで、タービン・圧縮機の温度条件を変更しないことに留意し、前置冷却器入口温度を 200℃とするように GTHTR300 のパラメーターの変更を行った。

初めに、タービン出口からの冷却材が再生熱交換器で冷やされることにより、前置冷却器入口温度が低下するため、その除熱量を減らす必要がある。このため、再生熱交換器で受け渡されるエネルギー量が低下するため、炉心入口温度が低下する。

炉心入口温度が低下した場合、炉心出力及び冷却材流量が同じであれば、炉心出口温度が低下してしまう。そのため、冷却材流量を下げることにより炉心出口温度を保つものとする。排熱の温度を上げるということは、再生工程で無駄な排熱を抑制する機能を弱めることになるので、発電効率は下がり、41.1%程度となった。

しかし、それでも 40%以上の高い発電効率を保つ。さらに、排熱利用は本来捨てるべき排熱を利用するため、熱の有効利用という観点からは非常に効率的なものとなる。地域暖房などの低温利用の用途に対して、排熱利用時には発電と熱利用を合わせた熱利用率は 100%に近いものとなる。これは、先行研究の結果である付録 A の Fig. A.1 で直接再生サイクルが低温熱利用において 8 割近い熱利用率を示しているのと同様である。

なお、需要調査において、この排熱を強化した炉型を GTHTR300HTW と呼称する。

2.3 需要調査に用いる GTHTR300 の炉型と諸元

これらの結果を踏まえて、以下の Table 2.1 の諸元を需要調査に用いるものとする。エネルギー利用の観点からは、排熱を無くすことも有用であることが分かったため、新たに、熱供給専用炉も加えるものとする。GTHTR300Heat 及び、GTHTR300HeatII、GTHTR300HTW は本研究で需要評価のための提案であり、実際の採用には技術検討が必要になると思われる。なお、GTHTR300、GTHTR300C、GTHTR300C-II の諸元は参考文献 19)の値に基づいている。

Table 2.1 Electricity and heat generation of GTHTR300 series

	電気出力 (MW)	熱供給 (MW)	排熱 (MW)	備考
GTHTR300	274(46%)	−	326	排熱利用<160℃
GTHTR300HTW	246(41%)	−	354	排熱利用<200℃
GTHTR300C	202(47%)	170	228	熱利用<900℃、排熱利用<160℃
GTHTR300C-II	103(41%)	343	154	熱利用<900℃、排熱利用<160℃
GTHTR300Heat	−	600	−	熱供給専用炉 <800℃
GTHTR300HeatII	−	600	−	熱供給専用炉 <900℃

2.4 日本のエネルギー需要

資源エネルギー庁の 2015 年度におけるエネルギー統計 [27]より、エネルギー転換部門及び製造業のエネルギー需要を Table 2.2、Table 2.3 に示す。なお、エネルギー需要としては、他に、農林水産鉱建設業、業務他、家庭、運輸などがあるが、既に一部利用されている、漁業（養殖）検討例が十分になされている地域暖房（融雪）の他に有望なものが少ないと思われるため検討対象から除外した。最終的なエネルギー消費と区別する意味では、エネルギー転換部門はエネルギーの供給、製造業部門ではエネルギーの需要を示しているとも理解できる。エネルギー転換部門では、エネルギー源の転換への投入量を負号、転換によるエネルギーの生成量を正号で表す。[28]、その観点から見ると、石油製品製造には熱エネルギー（エネルギー源転換への投入

量）が 119PJ/y 程度、必要となることが分かる。また、自家用蒸気（転換によるエネルギーの生成量）により 862PJ/y の熱エネルギーが発生され、自家用発電により 563PJ/y の電力が発生され、コンビナート内などでの工業用途に利用されていると考えられる。ただし、供給する温度にもよるが、石油製品製造に必要なエネルギーが自家用蒸気発生から賄われている可能性もある。

今回は、商用発電の検討は目的外であるため、エネルギー転換部門では石油製品製造、自家発電、自家蒸気発生の 3 項目に候補が絞られる。設備稼働率を仮に高温ガス炉の稼働率 90%とすると、これらのエネルギーを供給するための設備容量としては、石油製品製造では 4,190MWt、自家発電は 19,822MWe、自家用蒸気発生は 30,350MWt、となり、これらの合計を GTHTR300 シリーズの発電専用の GTHTR300、熱供給専用炉の GTHTR300Heat、GTHTR300HeatII で賄う場合は、石油製品製造に GTHTR300Heat もしくは GTHTR300HeatII が 7 基、自家発電に GTHTR300 が 72 基、自家用蒸気発生に GTHTR300Heat もしくは GTHTR300HeatII が 50 基となる。

なお、自家用発電と共に水素製造を行うものとして GTHTR300C を導入すると導入基数が増え、98 基程度となる。「2100 年ビジョン」[23,24]では、2100 年時点で自家用発電及び水素製造を目的とした高温ガス炉の導入基数が 120 基となっていたが、おおむね合致する評価である。詳細な検討を行うためには、巨視的な視点からではなく、導入候補地を絞った検討が必要となる。Table 2.3 の製造業を見ると、大型の熱利用が期待できるのが、化学工業、パルプ・紙・紙加工、鉄鋼業である。

Table 2.2 Energy supply from energy conversion division (PJ/y)

	電力	熱
石炭製品製造	0	0
石油製品製造	0	−119
ガス製造	0	0
事業者用発電	3060	0
自家用発電	563	0
自家用蒸気発生	0	862
地域熱供給	−4	22
他転換・品質振替	0	0
自家消費・送配損失	−328	−6
合計	3291	760

Table 2.3 Energy demand for manufacture division (PJ/y)

	電力	熱
食品飲料製造業	90	26
繊維工業	33	43
木製品･家具他工業	13	1.3
パルプ･紙･紙加工品	109	193
印刷･同関連業	16	0.26
化学工業（含 石油石炭製品）	169	257
プラスチック･ゴム･皮革製品製造業	56	5
窯業･土石製品製造業	84	18
鉄鋼･非鉄･金属製品製造業	313	109
機械製造業	243	35
他製造業	12	0.49
製造業(大規模･指定業種)重複補正	−31	−29
合計	1106	659

2.5 需要地を想定した検討

前節の検討から、導入に有力な候補として、石油製品製造、化学工業、パルプ・紙、鉄鋼業であることが分かった。ここでは、産業ごとに検討を行った。なお、エネルギーの需要に対しての検討であり、具体的な高温ガス炉の導入についての検討は対象外である。

(1) 石油精製

石油の精製には常圧蒸留装置が用いられる。原油を蒸発させ、凝縮する温度（沸点）の差を利用し、原油を LP ガス、ナフサ、ガソリン、灯油等のそれぞれの成分に分離する方法である。

Table 2.4[29]には 2015 年の日本の製油所の製油能力を示した。水島が日本の製油能力の 1 割程度を占め 38 万 bbl/d と最も多い。10-20 万 bbl/d の範囲が主流である。

Table 2.4 Petroleum purification capacity in Japan

製油所	製油能力(bbl/d)	製油所	製油能力(bbl/d)
JXエネルギー(水島)	380,200	JXエネルギー(仙台)	145,000
JXエネルギー(根岸)	270,000	富士(袖ケ浦)	143,000
東燃ゼネラル(川崎)	258,000	JXエネルギー(大分)	136,000
昭和四日市(四日市)	255,000	コスモ(四日市)	132,000
鹿島(鹿島)	252,500	東燃ゼネラル(和歌山)	132,000
コスモ(千葉)	220,000	JXエネルギー(麻里布)	127,000
出光(千葉)	200,000	西部(山口)	120,000
出光(愛知)	175,000	大隅(四国)	118,000
出光(北海道)	160,000	大阪国際石油精製(大阪)	115,000
東燃ゼネラル(堺)	156,000	南西(西原)	100,000
極東(千葉)	152,000	コスモ(堺)	100,000

ロシアとドイツの複数の石油精製プラントのエネルギー収支[30]では、石油精製時のエネルギー消費の内、半分程度がプロセス蒸気と電気であり、必要とされる熱エネルギーと電力の比は 5:2 程度、石油精製に用いる温度は 300-400℃であるとのものである。そして、この文献では 400MW(200MW×2 基)の核熱を利用した石油精製プラントのモデルケースが示されている。その製油能力は 6-7 百万 t/y である。この情報から、コジェネレーションによる熱電併給の石油精製プラントの条件としては、製油能力は 13 万 bbl/d、熱供給量は 400MW、電気供給量は 160MWe とした。

高温ガス炉の熱電供給能力に対し、このバランスで製油能力を変更するものとする。ここで、熱利用温度が 300-400℃であることから、排熱は利用できない。また、温度が比較的低いことから、出口温度 850℃炉心でも十分であると言える。これらのことから、GTHTR300C、GTHTR300C-II、GTHTR300 と GTHTR300Heat 1 基ずつの組み合わせの 3 ケースについて評価した。結果を Table 2.5 に示す。なお、石油精製プラントも 8 割から 9 割の稼働率[31]であるため、稼働率による補正は行わず、単純に設備容量で比較を行った。

Table 2.5 Specification of petroleum purification plant with HTGR

	GTHTR300C	GTHTR300C-II	GTHTR300 + GTHTR300Heat
製油能力(bbl/d)	55,000	112,000	195,000
熱供給(MWt)	170	343	600
電気供給(MWe)	202	103	274
電気供給の過不足(MWe)	134	−34	34

GTHTR300C では、電力の余りが多く、石油精製プラントの熱電力需要とは合致しなかった。熱利用を強化した GTHTR300C-II がプラントのニーズに合致しており、10 万 bbl/d 級のプラントなら GTHTR300C-II 1 基で十分である。20 万 bbl/d 級の大きな製油能力を許容できるのであれば、GTHTR300 と GTHTR300Heat の組み合わせのバランスが良い。さらに、出口温度 850℃炉心のみで構成できる利点がある。大きな製油能力と言っても、水島には 2 セットの導入が可能である。このプラントの熱供給に関し最適化した高温ガス炉の設計も考えられる。

今後は、現状に合わせて製油プラントのニーズを精査するとともに、それに適した専用の高温ガス炉プラント設計も行っていくべきである。

(2)化学工業

化学工業の代表はエチレン製造であり、エチレンは化学製品の原料である。エチレンは石油製品のナフサを 870℃の高温で熱分解することにより得られる [32]。 Table 2.6 に 2009 年におけるコンビナートごとのエチレン製造能力 [33]を示す。京葉コンビナートが 248 万 t/y で圧倒的に多い。そのほかは 90 万 t/y、60 万 t/y、50 万 t/y 程度の製造能力である。また、製造能力 40 万 t/y のプラントに必要とされる熱供給量は 390MW、電気供給は 5MWe となっている [32]。ほとんど電力は必要とされていない。また、2012 年、2 月の国内のエチレン製造施設の稼働率は 84.5%[34]であり、高温ガス炉の稼働率 90%とほぼ同等であり、稼働率では補正せず設備容量にて比較するものとした。また、エチレン製造は高温の熱を利用するため、出口温度 950℃炉心のみが対象となる。選択した高温ガス炉の炉型とエチレン製造プラントの能力を Table 2.7 に示す。エチレン製造には電気供給は余り必要とされないので、950℃炉心の熱供給専用炉である GTHTR300Heat II が最も適しており、製造能力も 62 万 t/y であるため、各コンビナートに１基、京葉には４基導入できる。

Table 2.6 Ethylene generation capacity of industrial complexes

	エチレン製造能力（千t/y）
京葉	2,477
京浜	895
水島	893
鹿島	828
周南	623
大分	615
四日市	493
堺高石	455

Table 2.7 Specification of ethylene generation plant with HTGR

	GTHTR300C	GHTR300C-II	GTHTR300Heat II
エチレン製造能力(t/y)	174,000	352,000	616,000
熱供給 (MW)	170	343	600
電気供給 (MWe)	202	103	0
電気供給の過不足(MWe)	199.8	98.6	−7.7

(3)パルプ・紙工業

パルプ・紙についてはノルウェーの照射試験炉ハルデン炉にてパルプ工場へのプロセス蒸気の供給実績があり、195℃の蒸気を毎時 25t 供給 [35]している。日本では富士市のパルプ・紙の生

産が有名であり、2016年において日本全国の生産量が26,478千tに対し、富士市は約1割(9.1%)の 2,416 千 t[36]を生産している。パルプ・紙製造に必要なエネルギーは日本のエネルギー統計[37]より日本全国において年間エネルギー消費量は 5,535×10^{10}kcal、そのうち電力の消費量は 2,433×10^{10}kcal との値を用いる。仕事率に換算すると富士市の規模では熱で 374MWt、電力で 293MWe のエネルギーが必要となる。ハルデン炉の実績でパルプ・紙製造には 195℃の蒸気を供給していることから、高温ガス炉の排熱の上限値の 200℃で十分に賄えることがわかる。そこで、排熱を強化した GTHTR300HTW が適している。設備容量にして熱供給 354MWt、電力供給 264MWe であり、GTHTR300HTW 1 基で富士市の需要に合致している。

(4)鉄鋼業

鉄鋼業、つまり、製鉄に関しては、1.3 節で紹介したように GTHTR300C-II と共に製鉄プラントの概念設計がなされている。GTHTR300C-II 1 基に対し稼働率 90%を想定すると 57 万 t/y の製鉄能力が評価される。なお、2011 年の鉄鋼生産量実績[38]に、上記の諸元を当てはめて評価を行った。結果を Table 2.8 に示す。高温ガス炉製鉄には既存の高炉を用いるのではなく、新たにシャフト炉を導入するが、高炉以外の設備は既存の製鉄所のものを用いることを想定するため、現在の製鉄量を基準にすることとした。製鉄能力の低い幾つかの製鉄所を除いては GTHTR300C-II の導入が可能であり、最大規模の福山製鉄所では 18 基程度導入可能であり、全国では 140 基程度の導入が可能である。製鉄業でも鉄鉱石の還元時に大量に発生する CO_2 は問題視されており、IS プロセスから生成した水素を還元に用い、従来法の CO_2 の発生の 99%削減できる高温ガス炉製鉄に置き換えることは社会的要求ともいえる。

Table 2.8 Steelmaking capacity and installation number of GTHTR300C-II

		生産量(1000t/y)	導入基数			生産量(1000t/y)	導入基数
新日本製鉄	室蘭	1,537	2.7	住友金属工業	鹿島	6,729	11.9
	君津	8,515	15.0		和歌山	4,642	8.2
	名古屋	6,247	11.0		小倉	1,311	2.3
	広畑	693	1.2		製鋼品	36	0.1
	八幡	3,623	6.4		直江津	--	--
	大分	9,586	16.9		計	12,718	22.4
	新日鉄住金ステンレス	427	0.8	神戸製鉄所	加古川	5,790	10.2
	計	30,628	54.0		神戸	1,200	2.1
JFEスチール	千葉	4,062	7.2		高砂	174	0.3
	京浜	4,058	7.2		計	7,165	12.6
	東日本計	8,120	14.3	日新製鋼	呉	3,194	5.6
	倉敷	8,727	15.4		周南	545	1.0
	福山	10,041	17.7		計	3,739	6.6
	西日本計	18,768	33.1	合計		81,146	143.1
	知多	8.6	0.0				
	計	26,897	47.4				

3. まとめ

東京電力福島原発事故を契機に、高温ガス炉の持つ高い安全性が注目され、エネルギー政策にも軽水炉より安全な発電用原子炉として組み込まれつつあり、高温ガス炉の本格的な実用化について議論を進められている状況にある。そして、この安全性により可能となる近接立地、900℃に及ぶ高温の利用、高い経済性などの高温ガス炉特有の特徴を考慮すれば更なるエネルギー需要に応えることができるはずである。そこで、需要が明らかな商用発電に関わる部分以外において、現在の国内の需要調査を行い、高温ガス炉の導入基数の評価を行った。なお、それに必要な知見を整理するために、商用高温ガス炉設計である GTHTR300 の熱バランスを検討も行っている。以下に、調査及び検討の結果をまとめる。

GTHTR300 の熱バランス検討に関し以下の結果を得た。

・GTHTR300 の排熱を 200℃へ高温化した際のプラント諸元及び発電効率を評価した。その結果、発電効率は 41%程度まで下がることが分かった。なお、この炉型を GTHTR300HTW と呼称した。なお、その設計思想の妥当性を示す目的で GHTR300 及びコジェネレーションを目的とした GTHTR300C の熱バランスの検討も行った。

・先行研究では熱利用率が重視されており、その観点から熱供給専用炉であり出口温度 850℃の GTHTR300Heat と出口温度 950℃の GTHTR300HeatII を需要調査用に提案した。

国内需要調査の結果、高温ガス炉導入検討に関し以下の結果を得た。

・製油プラントに対しては、熱エネルギーとし必要な温度域としては 300-400℃でありコジェネレーションのための熱供給量を倍増させた GTHTR300C-II、大規模なプラントには GTHTR300 と GTHTR300Heat の組み合わせが適している。日本の製油所の規模では 10-20 万 bbl/d が主体であり、各製油所に GTHTR300C-II 1 基の導入が可能である。20 万 bbl/d 級の製油所には GTHTR300 と GTHTR300Heat の組み合わせが 1 セット、日本で最大の 40 万 bbl/d 級の水島には 2 セットの導入が可能である。

・エチレン製造には 870℃の高温が必要であり、必要とされるのは熱エネルギーであり、電力はほとんど必要としない。そのため GTHTR300HeatII が適していることが分かった。日本の代表的なコンビナートには 1 基、京葉コンビナートには 4 基程度導入できる。

・パルプ・紙製造には 195℃のプロセス蒸気が必要であり、排熱温度を強化した GTHTR300HTW が適している。日本一の規模であり日本の生産の 1 割を占める富士市には 1 基の導入が可能である。

・製鉄に関しては先行研究で提案された GTHTR300C-II を用いた水素還元による製鉄法の導入を想定すると、日本で 140 基程度の導入が可能である。

今後は、これらの検討の結果を受け、熱利用に関する設計の広範囲化及び詳細化を行い、高温ガス炉導入シナリオ検討に資するものとしていく予定である。

謝　辞

本研究を行うにあたり、「2100 年ビジョン」の著者であり導入効果の専門家である高温ガス炉水素・熱利用研究センター研究推進室の立松研二氏、本研究に関わる設計情報等を提供していただいた安全設計グループの大橋弘史氏、同じく、高温ガス炉ガスタービンプラント設計・制御の専門家である佐藤博之氏、本研究に関わる共同研究を行い本研究に関する示唆をいただいた、株式会社　東芝の丸山茂樹氏及び浅野和仁氏には本研究に関して貴重なご助言をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 日本原子力研究開発機構, “－100 年後も住みやすい地球であるために－　高温ガス炉”, 日本原子力研究開発機構,(2011).

2) 外務省, “報道発表：日・ポーランド外相会談 平成 29 年 5 月 18 日,”(2017), URL: http://www.mofa.go.jp/mofaj/press/release/press4_004624.html (アクセス日：2018 年 3 月 22 日).

3) 高田 昌二, “高温ガス炉(HTTR)で炉心流量喪失時における安全性を実証する試験を開始; 第 1 回目の炉心流量喪失試験を終了”, 日本原子力学会, 日本原子力学会誌, 53(3), pp.167-168, (2011).

4) 日本原子力研究開発機構, “－炉心溶融しない安全な原子炉－　高温ガス炉”, 日本原子力研究開発機構,(2016).

5) 高田 昌二, 滝塚 貴和, 國富 一彦他, “ 高温ガス炉ガスタービン発電システム (GTHTR300)の発電系設計”, 日本原子力学会和文論文誌, 1(4), pp.341 - 351, (2002).

6) S.Kasahara, T. Murata, Y. Kamiji, et al., “Heat transport analysis in a district heating system applying waste heat from GTHTR300, a commercial design of high-temperature gas-cooled reactor,” Mechanical Engineering Journal , 3(3), p.15-00616_1-15-00616_16, (2016).

7) 稲葉 良知,小川 益郎,菱田 誠, “核熱利用システムの構築に関する研究,” JAERI-Tech 96-017, 53p,(1996).

8) 文沢 元雄,稲葉 良知,菱田 誠他, “ガスタービンプロセスを用いた原子力コジェネシステムの予備検討”, JAERI-Tech 95-055,125p, (1995).

9) 文沢 元雄,稲葉 良知,菱田 誠他, “核熱・石炭によるメタノール製造システム概念の検討”, JAERI-Tech 96-002, 107p,(1996).

10) 総務省, “メタノール自動車保有台数”, 総務省ホームページ URL: http://www.soumu.go.jp/main_content/000028493.pdf (アクセス日：2017 年 3 月 27 日).

11) 稲葉 良知,文沢 元雄,菱田 誠他, “核熱利用システムの現状と将来動向”, JAERI-Review 96-007, 87p, (1996).

12) 稲葉 良知,文沢 元雄,菱田 誠他,“核熱利用システム構築に必要な基礎検討”, JAERI-Tech 96-019, 122p, (1996).

13) 文沢 元雄,稲葉 良知,菱田 誠他,“核熱による二酸化炭素の再利用システムの検討”, JAERI-Tech 96-022, 82p, (1996).

14) 稲葉 良知,文沢 元雄,菱田 誠他,“核熱の産業利用に関する検討”, JAERI-Tech 96-057, 132p, (1997).

15) 田中 利幸, “高温ガス炉 HTTR の臨界”,エネルギーレビュー,19(3),pp.46-49,(1999).

16) 久保 真治,小川 益郎, “水素製造・貯蔵の最新動向; 熱化学水素製造法 IS プロセス”,日本エネルギー学会誌, 92(11), pp.1041-1045, (2013).

17) 日本原子力研究開発機構,“工業材料で製作した熱化学法ISプロセス水素製造試験装置による水素製造に成功―実験室段階から高温ガス炉による水素製造の研究開発が前進―”, プレス発表,URL: https://www.jaea.go.jp/02/press2015/p16031801/ (アクセス日：2017 年 3 月 27 日).
18) X. Yan, K. Kunitomi, R. Hino, et al., “GTHTR300 Design Variants for Production of Electricity, Hydrogen or Both,” Third Information Exchange Meeting on Nuclear Production of Hydrogen Nuclear Science Committee, OECD, (2005).
19) X. Yan, S. Kasahara, Y. Tachibana, “Study of a nuclear energy supplied steelmaking system for near-term application,” Energy, 39(1), pp.154-165, (2012).
20) Y. Kamiji, H. Noguchi, A. Terada, “Flowsheet study of a multistage flash desalination system for cogeneration with high temperature gas-cooled reactor,”ICONE-22, #30142, (2014).
21) X. Yan, H. Sato, Y. Tachibana, “Evaluation of high temperature gas reactor for demanding cogeneration load follow,” J. Nucl. Sci. Technol., 49(1), pp.121-131, (2012).
22) 高温ガス炉水素・熱利用研究センター, “原子力機構の研究開発成果　2015: 6-4 高温ガス炉の多様な熱利用システムの確立に向けてー廃熱を利用した淡水製造コストの検討ー”, 日本原子力研究開発機構, (2015), URL:http://jolisfukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyu/mirai/2015/6_4.html (アクセス日：2017 年 3 月 27 日).
23) 経営企画部戦略調査室, “「2100 年原子力ビジョン」 - 低炭素社会への提言 - ”, 日本原子力研究開発機構,（2008）, URL: https://www.jaea.go.jp/02/press2008/p08101601/be2.pdf (アクセス日：2017 年 3 月 27 日).
24) 立松 研二, 川崎 弘嗣, 根本 正博, “100 年にわたるエネルギー需給構造の変革シナリオ”, 日本原子力学会誌,51(6),pp.463-467,(2009).
25) 文部科学省,経済産業省,気象庁,環境省, “IPCC 第 4 次評価報告書”, (2007), 気象庁ホームページ URL: http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html (アクセス日：2017 年 3 月 27 日).
26) 外務省, “北海道洞爺湖サミットの概要”, (2008), URL:http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/summit/toyako08/news/gaiyo0709.html (アクセス日：2017 年 3 月 27 日).
27) 資源エネルギー庁, “総合エネルギー統計”, 資源エネルギー庁ホームページ, (2017), URL: http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/ (アクセス日：2017 年 3 月 27 日).
28) 戒能 一成, “総合エネルギー統計の解説 / 2010 年度改訂版”, 経済産業研究所, (2010).
29) 石油連盟, “製油所の所在地と原油処理能力(2015 年 6 月末現在)”, 石油連盟ホームページ URL: http://www.paj.gr.jp/ (アクセス日：2017 年 3 月 27 日).
30) E.Raud, E. Romanova, M. Schad, “Utilization of process heat from the HTGR in the oil

refining and related industries", International Conference on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants (ANP'92), vol1, p.8.2/1-6, (1992).

31) JX エネルギー, "原油処理能力・処理量・稼働率の推移", JX エネルギーホームページ URL: http://www.noe.jx-group.co.jp/binran/data/pdf/40.pdf (アクセス日：2017 年 3 月 27 日).

32) IAEA, "Gas-Cooled Reactors and Their Applications", IAEA-TECDOC-436, (1987).

33) 京浜臨海部コンビナート高度化等検討会議, "京浜臨海部コンビナート高度化等検討会議報告", 神奈川県 地域政策課, (2011).

34) 住友・三井銀行, "産業アウトルック 2016 年 1－3 月期", (2016).

35) 中島 伸也, 高橋 博樹, 楠 剛他,"社会受容性に優れた分散型小型炉システムの検討; 大深度地下を利用した地域熱供給小型炉システム", JAERI-Tech 2005-057, 54p,(2005).

36) 富士市, "統計資料「富士市の工業」", 富士市ホームページ, (2017), URL: http://www.city.fuji.shizuoka.jp/sp/sangyo/c0302/fmervo000000idr5.html (アクセス日：2017 年 3 月 27 日).

37) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット, " EDMC/エネルギー・経済統計要覧",省エネルギーセンター, (2016).

38) 鉄鋼新聞, "製鉄所別粗鋼生産", 鉄鋼新聞ホームページ URL: http://www.japanmetaldaily.com/ (アクセス日：2017 年 3 月 27 日).

付録 A. 高温ガス炉の需要調査に関する先行研究と熱利用研究の変遷

原子力機構におけるこれまで需要研究及び熱利用研究を以下に整理する。

(1) 1995-1996 年における高温ガス炉熱利用研究

1995-1996 年に高温ガス炉熱利用の研究が精力的になされている。初めに、稲葉らにより、「核熱利用システムの構築に関する研究」と題した報告 [7]がなされている。過去の核熱利用例及び、検討例が示されている。以下に引用する。

核熱利用の過去の実績：

・1962 年 ハルデン炉（ノルウェー）; 紙パルプ工場へ蒸気供給（15t/h）。
・1962 年 コールダーホール原子力発電所（英国）; ウィンズケール工場への蒸気供給。
・1964 年 オゲスタ重水炉（スウェーデン）; 団地へ温水供給（9,000 戸、75-120℃）。
・1972 年 ダグラスポイント発電所、ブルース発電所（カナダ）;
重水製造プラントへ蒸気供給。
・1972 年　東海発電所　日本原子力発電（株）（日本）; 養魚に温排水供給。1982 年まで、他 6 ヶ所の国内原子力発電所で漁業用に温排水供給。
・1973 年 BN-350 ナトリウム冷却高速炉（旧ソ連）; 1989 年から海水淡水化（80,000m^3/d）と発電（80MW）。
・1975 年 セント・ローレン原子力発電所（フランス）; 温室栽培用温排水供給。1989 年までに、他 6 ヶ所の原子力発電所の農業への温排水供給。
・1979 年　高浜原子力発電所（日本）; ガラス温室へ温排水を供給。
・1980 年代　（ドイツ）; ザリーネの製塩工場へ蒸気供給。
・1985 年　ベツナウ原子力発電所（スイス）; 温水供給（2,000 戸、80-125℃）。
・ピカリング原子力発電所（カナダ）; 鱒養殖へ温排水（45,000t/d）。
・ブルース原子力発電所（カナダ）; 農業利用（180℃の蒸気 100t/h）。

核熱利用の検討例：

・化学プラント（メタノール、アンモニア、エチレン製造）における熱利用
・石油化学コンビナート、石油精製における熱利用
・アルミニウム製造における熱利用
・粗鋼製造、製鉄における熱利用
・紙・パルプ工場における熱利用
・石炭の液化・ガス化における熱利用
・海水淡水化
・水素製造における熱利用
・熱電併給、その他の蒸気供給

このように、核熱利用の実績に関しては、比較的低温もしくは排温の利用が多く、熱利用の検討に関しては、それに加え高温のプロセス蒸気を用いるもの、水素製造など新たな可能性が模索されていることが分かる。

次に文沢らにより「ガスタービンプロセスを用いた原子力コジェネシステムの予備検討」と題した報告 [8]がなされている。これは、発電の他に予測される熱利用に対して、熱利用の温度領域とサイクルの形態が比較検討されている。これらの検討については、450MW の原子炉が想定されている。サイクルの形態には大きく分けて、原子炉からの冷却材を直接タービンに供給する直接サイクルと、中間熱交換器を用い２次系冷却材をタービンに供給する間接サイクルがある。その他、前節で紹介した再生サイクル、タービンの段数を増やすために、下がったタービン出口温度を再熱する再熱サイクル、圧縮機段数を増やすために、圧縮後に上がった圧縮機出口温度を冷却する中間冷却サイクルなどの組み合わせが検討されている。再熱サイクル、中間冷却サイクルによるタービン、圧縮機の段数の増加は、サイクル特性を最も高効率であるカルノーサイクルに近づける工夫であり、これにより発電効率が上がる。なお、熱利用における中間熱交換器の位置などに関しても検討がなされている。最終的な結論としては、熱利用量を原子炉出力で割った熱利用可能最大効率という指標を新たに定義し、これに発電効率を加えたものをシステム効率と定義し比較している。その結果を Fig.A.1 に示す。200℃以下の低温域では直接・再生サイクルが有利、中温高温域では直接・再生・中間冷却サイクルが有利との結論を出しているが、低温域の優位性や、中温高温域での差が少ないこと、システムが簡素化などを合わせれば、直接再生サイクルが万能と言える。

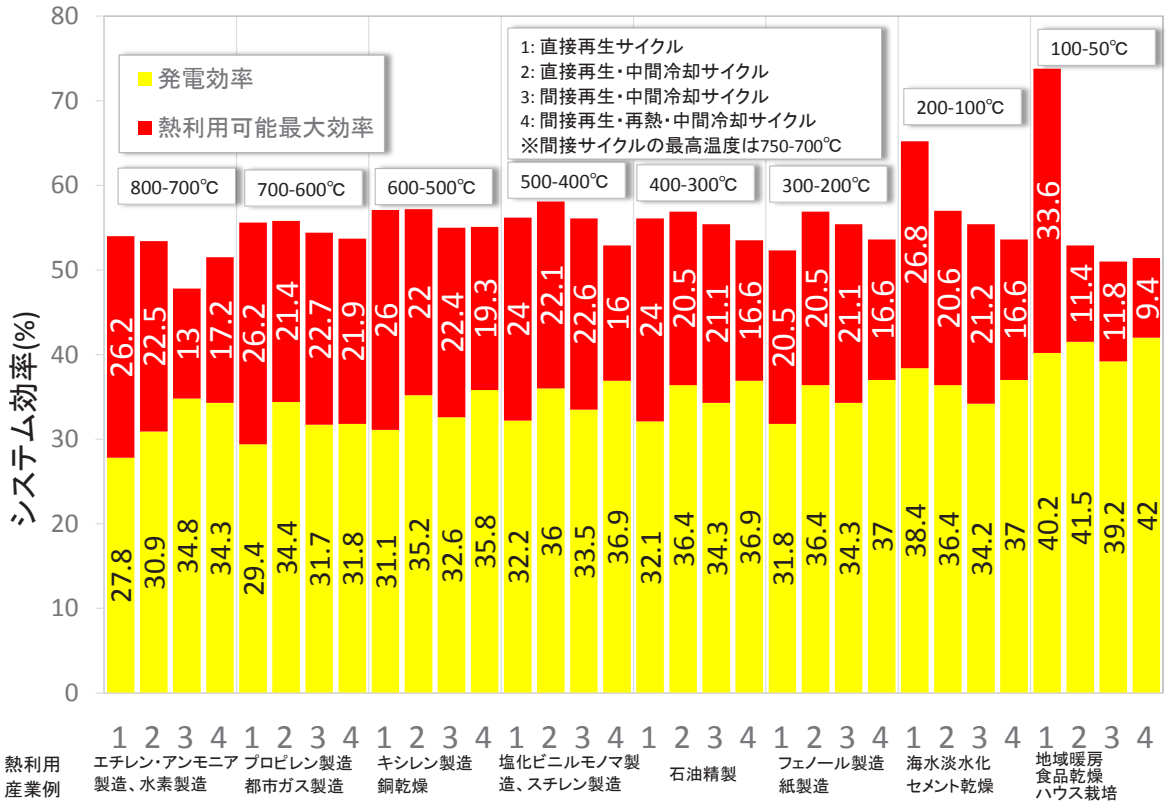


Fig. A.1 System efficiency of heat utilization

次に、文沢、稲葉らにより核熱の具体的な利用に関する検討がなされていくが、高温ガス炉特有もしくは、高温ガス炉により製造された水素の活用を目的とした路線に特化され研究が行われている。中でも、独創的な着眼点と言えるのは、CO_2削減に主な目的としている点とそのアプローチである。CO_2削減に関しては、原子力そのものの導入動機の一つであり、CO_2を排出しない、もしくは、排出量の削減を行うのが一般的であるが、この時期の研究では、燃料を改質に伴う CO_2の発生削減、CO_2を原料に工業製品を作れば CO_2そのものを減らせるという発想からのものである。

初めに検討されたのは石炭からのメタノール製造 [9]である。石炭は世界中に一様かつ豊富に存在する一次資源であることから、石炭利用における二酸化炭素削減を検討したものである。具体的には、石炭の部分酸化法による一酸化炭素生成と核熱により生成された水素を反応させるものである。

石炭の部分酸化：

$$(CH)+1/2O_2 \rightarrow CO + 1/2H_2 \qquad \text{(A-1)}$$

水素反応によるメタノール合成：

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH \qquad \text{(A-2)}$$

石炭部分酸化で発生する水素ではメタノール合成には不足なので、この不足する水素を核熱による水素で補おうという発想である。この研究では、核熱による水素製造として、高温水蒸気電解法とメタンの水蒸気改質法が想定されている。前者は高温の水蒸気を電気分解するもので、900-1000℃程度の高温の水蒸気を得るための熱を核熱で賄い、電気分解のための電力を原子力発電で賄う。後者は高温（800-850℃）でメタンと水蒸気を反応させることにより水素を得るものであり、この高温は核熱から得ることができる。なお、石炭の部分酸化は熱的に自立しており、核熱を必要としない。

メタノール需要の観点からは一般的な工業利用についても言及はしているものの、メタノール自動車に主眼が置かれており、代替候補である電気自動車、天然ガス自動車などと比較している。総務省 [10]によると平成 13 年から 19 年の 7 年間の日本のメタノール自動車の保有台数は 130、89、55、30、22、17、17 台と減少の一途をたどっている。要因としてガソリン車、ディーゼル車として比較して単位燃料あたりの走行距離が短い、メタノールによる燃料配管等の腐食防止が必要などの短所が考えられる。なお、メーカーへの聞き込みの結果、多くのメーカーでメタノール自動車からの撤退が報告されている。また、現在は、水素を用いる燃料電池車が発売されだしており、水素を製造するのであれば、燃料電池車を選択すべきとの考えもあり、メタノール製造に核熱を利用する検討は途絶えている。しかし、メタノール需要自体は伸びており、今後も需要の一つとして検討が続けられるべきである。

稲葉らによる「核熱利用システムの現状と将来の動向」[11]における検討では、核エネルギーの持つ可能性を長期的な世界エネルギー需給において現実に利用可能なものとするために、様々な熱利用の可能性を検討している。熱電併給、原子力製鉄、水素製造、化石燃料の改質、炭酸ガスのメタノール等への回収固定、の 5 つの用途があげられている。特に、最後の炭酸ガスのメタノール等への回収固定に関しては、近年、回収技術が発達しても処分法が困難である二酸化炭素を有効に利用できる技術であり、今後の導入が期待できる。

さらに、二酸化炭素を原料とした研究成果は報告され、「核熱利用システム構築に必要な基礎検討」[12]では、「炭酸ガスを原料とした化学製品製造技術」についての検討がなされている。結論として、実用化されているプロセスとしては、メタノール製造（メタンからの製造）、尿素製造、将来の技術としては、エチレン製造（メタンを原料）が二酸化炭素を原料とするプロセスとして有効であり、これらのプロセスに高温ガス炉から熱供給が行えるとしている。「核熱による二酸化炭素の再利用システムの検討」[13]では二酸化炭素の排出量の多い火力発電を対象に回収した二酸化炭素を利用し、メタノール、尿素、エチレン及びガソリンを製造するプロセスが検討され、それぞれのプロセスに高温ガス炉の核熱を利用している。なお、この研究では改良したエチレンプロセスと ARCO プロセス（Atlantic Richfield Company により提案された LNG からガソリンを合成するプロセス）を組み合わせた新しいプロセスが提案されている。

最後に「核熱の産業利用に関する検討」[14]では、高温ガス炉を用いたコンビナート等への熱供給について検討がなされている。

(2) GTHTR300 シリーズの研究開発

1998 年には HTTR が初臨界を達成し[15]、その後、着実に運転実績を積み重ねている。その流れを受けて 2000 年ごろから実用炉（商用炉）として GTHTR300 シリーズの設計研究が始まっている。GTHTR は Gas Turbine High Temperature Reactor の頭文字であり、300 は電気出力を示している。熱出力自体は 600MW であるため、発電効率 50%を達成できるポテンシャルを持つ。水素製造などコジェネ（Co-generation）を行う際には、名称の末尾に C を付け GTHTR300C のように区別される。なお、タービンシステムの設計として先行研究では、中間冷却概念も候補としていたが、発電効率の 2%の低減を許容する代わりに、システムの簡素化により建設費（資本費に直結）、運転・維持費用が 5%の削減（資本費＋運転維持費は費用の 70%程度、費用減は全体で 3.5%程度）が期待できるため敢えて、中間冷却概念を採用しない[5]という堅実な選択がなされている。商用炉設計が明確になると同時に、付随する技術も発展している。水素製造もそれまでメタンの水蒸気改質法が想定されていたが、Fig.A.2 に示すような IS プロセス[16]を想定するようになった。IS プロセスでは、硫酸の熱分解反応により酸素が発生し、ヨウ化水素の熱分解反応により水素が発生する。

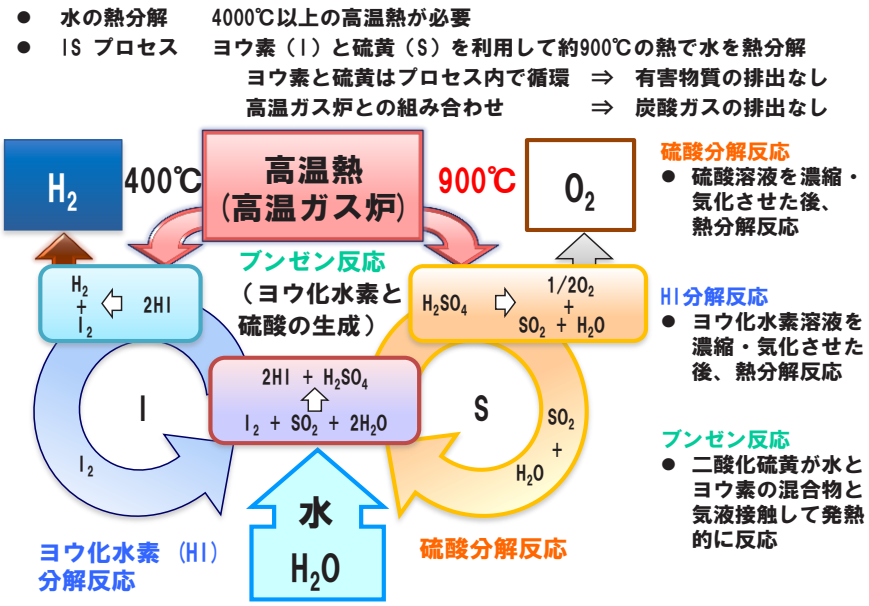


Fig. A.2 Hydrogen generation by IS process[4]

それぞれ、分解された硫酸とヨウ化水素は水を加えたブンゼン反応により復元され、再び熱分解に移行し酸素と水素を発生させる。

これは、水素製造で一酸化炭素もしくは二酸化炭素を発生させる水蒸気改質法とは異なり、水だけを原料とし水素を発生させる。先行研究ではメタンからメタノール製造を行い CO_2 削減をしていたが、この技術を用いれば、直接的に水素を用い、

$$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O \qquad \text{(A-3)}$$

とすることで、効果的に二酸化炭素削減ができる※こととなる。二酸化炭素を発生させない効率的な水素製造が開発されたことにより、「炭酸ガスを原料とした化学製品製造」の可能性も拡大することが期待できる。なお、この IS プロセスは 2016 年に日本原子力研究開発機構において、一般の工業材料のみを用いて製造した試験装置で毎時 10ℓの水素を 8 時間連続で製造することに成功[17]している。

なお、水素製造を行う GTHTR300C は発電のみを行う GTHTR300 と比較し、運転パラメーターのみの変更で対応できる[17]ことを基本的な概念としており、新たに開発する要素は少ない。GTHTR300 シリーズのタービンの諸元を Table A.3[19]に示す。GTHTR300 はシリーズの代表炉型であり、発電だけを行うため、原子炉出口温度 850℃の冷却材のヘリウムをタービンに直接流し込み 274MWe（発電効率 45.6%）の発電を行う。GTHTR300+では、炉心出口温度 950℃の冷却材を利用することにより、300MWe（発電効率 50%）の発電を行う。GTHTR300C では、炉心出口温度は 950℃であるが、炉心―タービン間に設置された中間熱交換器を用いて（Fig.2.2 参照）熱エネルギーを取り出すため、タービン入口には 850℃に低下した温度で流れ込む。このとき、タービンには代表設計と同じ 850℃の冷却材が流れ込むが、質量流量は 3 割ほど低減しており、発電量は 202MWe と低下する。しかし、熱利用側に供給した熱の 219MWt を除外した発電効率（発電量/（原子炉発熱量－熱利用側への供給量））では 46.8%となり、ほぼ代表設計と同じである。一方で、熱利用側に供給された熱で製造される水素は 1.9t/h であり、その水素から取り出すことができるエネルギーを考えた際のエネルギー効率は発電効率とほぼ同等の 45.5%となる[18]。ここまでは、Table2.1 に示すように、同一のタービン設計を用いる。一方で、GTHTR300C-II[19]は熱利用側に倍程のエネルギーを取り出す設計であり、入口温度が下が

Table A.3 Characteristics of gas turbine

	Gas turbine duty			Compressor section					Turbine section			
	Power [MWe]	Pres. Ratio	Mass flow [kg/s]	Speed [rpm]	Inlet T [℃]	Inlet P [MPa]	Rim speed [m/s]	# of stages	Inlet T [℃]	Inlet P [MPa]	Mean speed [m/s]	# of stages
GTHTR300	280	2.0	445	3,600	28.0	3.5	282	20	850	6.8	377	6
GTHTR300+	300	2.0	408	3,600	28.0	3.2	282	20	950	6.2	377	6
GTHTR300C	200	2.0	327	3,600	26.2	2.6	282	20	850	5.0	377	6
GTHTR300C-II	100	1.5	332	4,180	26.2	3.5	282	12	750	5.1	377	3

※高温水蒸気電解法でも高温ガス炉の核熱及び電力を用いれば二酸化炭素を発生させずに水素を作り出すことができるが、過去の研究では、必ず大規模かつ安価に水素製造が行え、実用化されている水蒸気改質法が引き合いに出される。文献 12)に記載される「炭酸ガスを原料とした化学製品製造技術」では、水蒸気改質法のみが水素製造の候補となっている。結局は、開発中の高温水蒸気電解法に関しては、得られる性能と技術開発の度合いにより候補となるか否かが決まる。現在の IS プロセスでは熱供給のみで水素製造ができ、工業化の見込みも得られつつある。

る関係から、タービンの設計自体が異なる。熱利用側に 343MWt の熱を取り出し、倍程度の 4.5t/h の水素を製造する。水素製造の効率は 42%[18]であるが、発電量は 103.4MWe で効率は 40.7%と若干下がる。

主な、コジェネレーションに関しては、上記で説明したように水素製造であるが、他の用途に関しても詳細な設計と共に整備されている。その代表例を以下に示す。

初めに、製鉄[19]について紹介する。この製鉄においても、電気だけではなく、高温ガス炉核熱を利用して製造された水素を有効にもちいることにより CO_2 削減を図っている。鉄鉱石は鉄の酸化物であり、製鉄するには、還元剤を用い還元する必要がある。一般的に還元剤としてはコークス（炭素）や天然ガスが用いられるため、製鉄自体が大量の CO_2 を発生する原因となっている。以下に化学式を示す。

$$2Fe_2O_3(\text{鉄鉱石})+3C(\text{コークス})\rightarrow 4Fe+3CO_2 \qquad \text{(A-4)}$$

$$4Fe_2O_3(\text{鉄鉱石})+3CH_4(\text{天然ガス})\rightarrow 8Fe+6H_2O+3CO_2 \qquad \text{(A-5)}$$

この還元剤として、高温ガス炉で製造された水素を用いれば CO_2 の発生を従来法の 1 %程度まで大幅に削減できる。

このシステムの模式図を Fig.A.4 に示す。なお、このシステムで用いる炉型は水素製造能力に特化させるため GTHTR300C-II としている。600MWt の出力の高温ガス炉で中間熱交換器を用い 900℃の高温を 343MWt 水素製造プラントに供給する。製造された水素は、シャフト炉に供給され鉄鉱石の還元に用いられる。鉄の融点の 1,535℃よりも低い 1000℃程度で還元剤ガスにより固形のまま還元するため、直接還元法とよばれる。還元された鉄は直接還元鉄（DRI: Direct Reduced Iron）と呼ばれる。この直接還元鉄を最終的な精製工程において、電気炉で溶かし、不純物除去、成分調整を行い鋳造し製品となる。酸素の一部は水素の燃焼によりシャフト炉に熱を供給することと、電気炉で鉄中の不純物を除去するために用いられる。この還元工程で製造した水素はすべて使われるが、製造量の約 7 割の 624t/d の酸素は余る。高温ガス炉で発生した熱エネルギーで水素製造プラントへ供給したもの以外の残りのエネルギーで 103MWe を発電し、88MWe はこの精製工程の電気炉の電力として供給され、残りの 15MWe は電力網へ供給され売電される。結果として年間 63 万 t の鉄鋼の製造が可能となる。コスト評価も

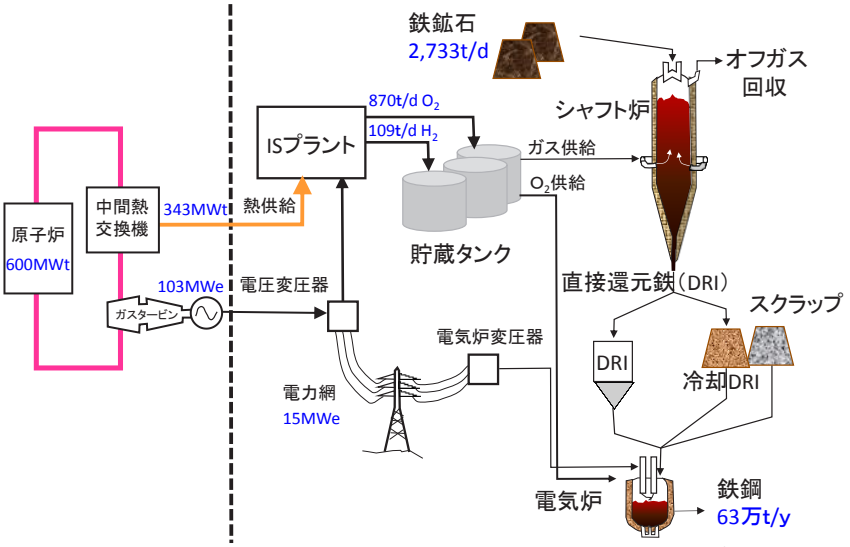


Fig. A.4 Schematic of GTHTR300C nuclear steelmaking system

なされており、従来法と比較し 1 割程度安価な製鉄が可能であるとの試算がなされている。

高温ガス炉は排熱も温度が高く、設計によって最大 200℃まで利用 [6]できる。この特性を利用した排熱利用の研究もなされている。排熱利用の場合は、元々、環境に廃棄する熱を利用するため、発電量が低下することもない。現在では、海水淡水化、融雪について研究がまとめられている。

海水淡水化 [20]は中東向けの概念であり、中東では水と電気を併産するコジェネレーションプラントに大きな需要がある。ここでは、多段フラッシュ方式海水淡水化プラントを想定している。この方式では、海水を蒸発させて再び凝縮させて淡水を得る（蒸留）するものであり、減圧することにより、100℃以下でも蒸留ができる。Fig. A.5 は高温ガス炉の前置冷却器から海水淡水化プラントへの熱供給時のヒートバランスを示している。前置冷却器からにおいて、一次系ヘリウムは 164℃から 28℃まで冷却される。このとき、原子炉での発生エネルギーが 600MW であり、その内の 46.8%が発電に用いられるので、残りの 316MW が前置冷却器から排出される。前置冷却器の 2 次側では冷却水が 652kg/s で循環し、22℃の冷却水が 140℃まで上昇し、蒸気発生器を通じて、海水淡水化プラントに 110℃以下の蒸気が供給される。このとき、淡水化プラントで最大で 248MW の熱が利用される。これは、排熱の 8 割程度を利用していることとなり、電力と合わせて原子炉の発熱の 9 割程度が利用されていることとなる。

高温ガス炉 1 基で一日 5 千 5 百万ℓ（12MIGD*）の淡水化が可能となる。一人当たり一日 220 ℓ使用する**と想定すると、高温ガス炉 1 基で 25 万人分の水が供給できることになる。なお、この研究では、海水化プラント側の最適化も行っており、多段フラッシュの段数を 2 段から 3 段に増やすことにより、効率的な淡水化ができ、蒸発器の伝熱面積を 28%低減できるとの結果が得られている。その結果、コスト評価では、一般的な天然ガスを用いたコンバインドガスタービンプラントに比べ 50%以下の安価な淡水製造コスト [22]を達成している。

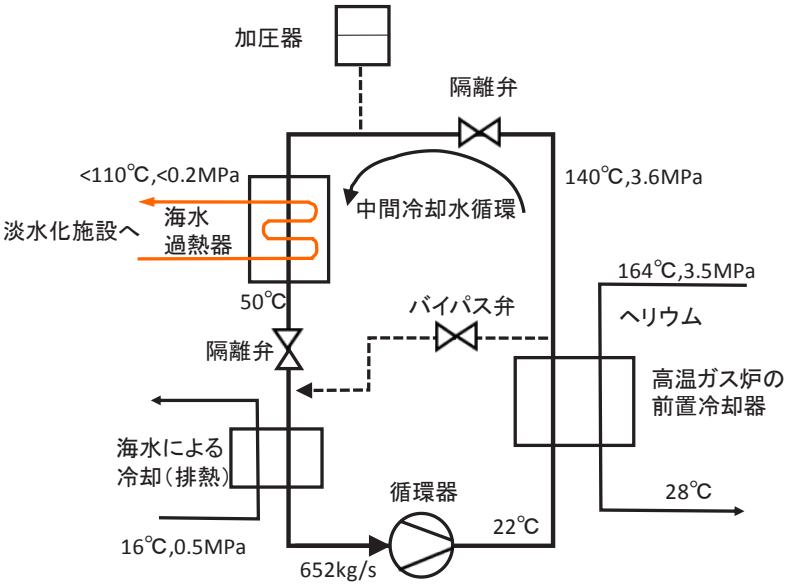


Fig. A.5 Schematic of heat transfer from precooler

*MIGD はメガ・インペリアル・ガロン・パー・デイの略である。
**東京都水道局調べ https://www.waterworks.metro.tokyo.jp/faq/qa-14.html

融雪に関しては、札幌市及び石狩市を需要地と想定した評価 [5]がなされている。その概要を示した概念図を Fig. A.6 に示す。家庭用暖房及び路面の融雪に関しての熱需要は 1 月が最大で、303.3MW 及び 131,31MW との評価がなされている。一方で、GTHTR300 1 基の排熱で利用可能なものは 220MW である。設置場所は安全性を考慮し、札幌からは 40km、石狩市（市庁）および岩見沢市（熱供給の対象外）は 30km 離れている石狩市中部を想定した。これら遠隔地への原子炉の設置とそれに伴う送水時の熱損失を考慮すると、GTHTR300、3 基 660MW の熱供給が必要であるとの評価がなされた。なお、原子炉から需要地まで熱を送るためには、温水を循環させる必要があり、行きと帰りの 2 本の配管が必要となるが、配管を 2 重管とし、帰りの温水で行きの温水の放熱を抑える工夫により、原子炉から熱利用地域入口までの送水に伴う熱損失を半減することに成功している。送液時の熱損失を考慮しても、温度は暖房及び融雪には十分に高く、主要都市から十分に離れた場所に設置が可能であった。

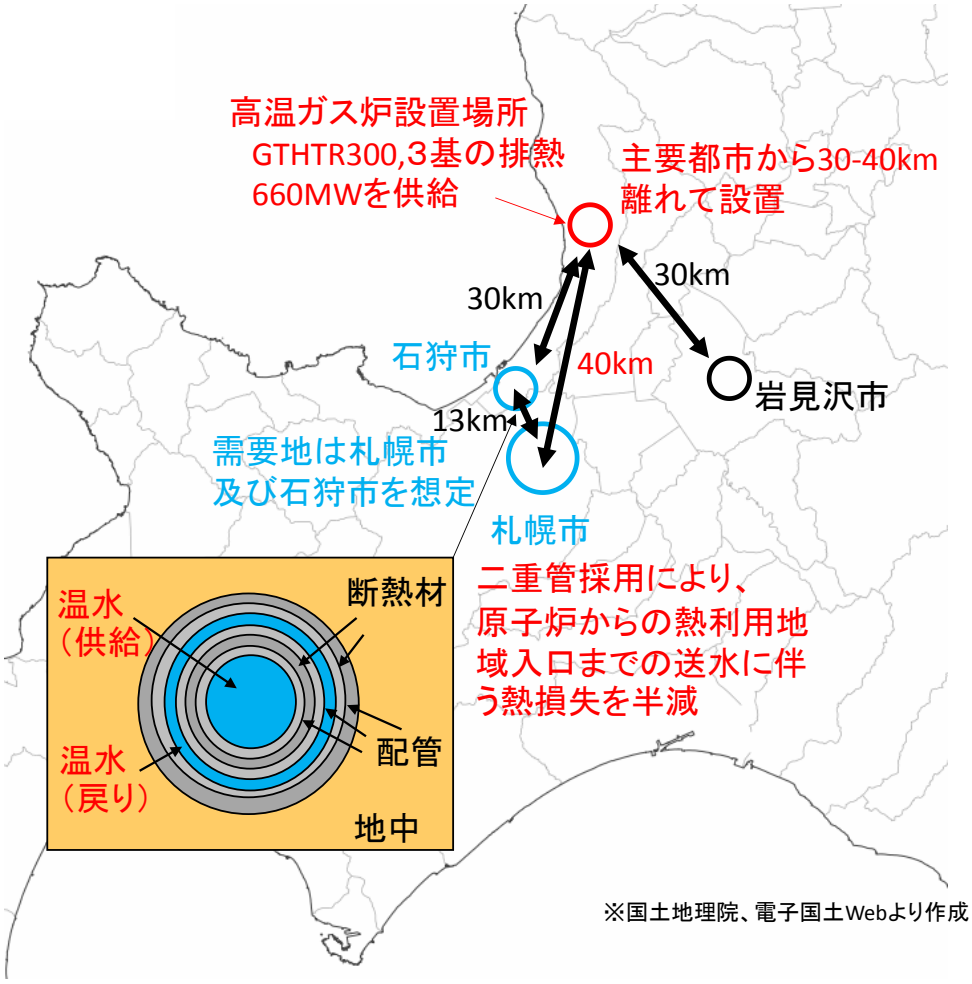


Fig. A.6 Schematic of heat transfer for load snow and household heating

このように、GTHTR300 の設計の詳細化に伴い、注目される概念や研究性の高い概念に関しては熱利用に関しても、熱利用に関する需要も具体的に評価されている。今後は、網羅的に想定される需要に対する評価を行い、高温ガス炉コジェネレーションのポテンシャルを確認していく必要がある。

(3)高温ガス炉全体に対する導入効果検討

一方で、高温ガス炉全体の導入検討についてもなされている。2008 年には日本原子力研究開発機構として、「2100 年原子力ビジョン」－低炭素社会への提言－[23,24]と題した、意見書を発表している。これは、2007 年に採択された気候変動に関する政府間パネル（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）の第四次評価報告書によって、人類の経済活動の拡大に伴う温室効果ガス（二酸化炭素等）の排出増が気候変動の主な要因であるとの合意が形成された[25]こと、2008 年に我が国で開催された G8（主要 8 か国首脳会議）北海道洞爺湖サミットでも主要議題とされ、2050 年までに世界全体の温室効果ガス排出量を少なくとも 50%削減するとの合意がなされた[26]関係で出されたものである。この提案の趣旨としては、原子力を活用することにより二酸化炭素排出の削減を図るものであり、IS プロセスによる水素製造等により、高温ガス炉も重要な役割を果たしている。この評価においては、商用発電の目的としては、軽水炉、資源論の観点から軽水炉をリプレースしながら導入される高速増殖炉、将来の導入が期待される核融合炉に限られ、高温ガス炉の用途は運輸・産業用の水素供給、化学プラント等への蒸気供給・自家発電に限られるが、それでも高温ガス炉は 2100 年には 120 基の導入が見込まれている。なお、自動車は 2100 年にはすべて、燃料電池車もしくは電気自動車に置き換わるものと推定している。しかし、東京電力福島原発事故以降、原子力に求められる安全に対する要求は強まり、発電用原子炉としても高温ガス炉の導入が期待されている。今後は、高温ガス炉の発電をベースとしたコジェネレーションに関しても検討されるべきである。

付録 B. 熱バランス評価コードの整備

今回の熱バランスの評価は新たにプログラムを整備し行った。著者は既に、核燃料サイクル概念設計のための諸量評価コードシステム DAMOCLES を開発しており、核設計用データベース整備の一環として、冷却材に対する熱物性データベースの整備も行っている。[B1)]

上記の熱物性データベースでは、原子炉内の燃料温度を評価する目的のための最低限の実装がなされている。具体的には、炉心の冷却材を代表して与えるための圧力をシステム圧力として与え、燃料棒の発熱がすべて冷却材に与えられると仮定し、エンタルピーの増加量を評価し、そのエンタルピーの値の関数として、冷却材の物性を取得するものである。今回は、タービン及び圧縮機を対象とするため、圧力変化の影響を明示的に扱う必要があり、エントロピーのデータバースが必要となった。そこで、本研究では、初めに、このデータベースの拡張を行った。概要を以下に示す。

ヘリウムに関しては、単原子分子であるため、理想気体として扱える。ヘリウムの kg 重量単位における気体定数は R=2.07723×10^3[J/(kg・K)]であり、定圧比熱 Cp[J/(kg・K)]は、

$$C_p = \frac{5}{2}R = 5.192\text{x}10^3 \quad [\text{J/(kg・K)}] \qquad (B-1)$$

エンタルピーは、常温を基準として以下のように与える。

$$H(T) = C_p(T - 298.15) \qquad (B-2)$$

エントロピーは、常温、大気圧を基準として以下のように与える。

$$S(T,P) = C_p \ln T - R\ln P - (C_p \ln 298.15 - R\ln 101325) \qquad (B-3)$$

この関係により、温度とエンタルピー間の変換が可能となり、エンタルピーの関数として、各物性を使用することが可能となる。

水・蒸気系に関しては、参考文献 B2）に蒸気表の関数が定式化されており、その定式化に従いプログラムを作成しシステムに取り込んでいる[B1)]。蒸気表は液体、気体、超臨界圧状態をとり、それぞれの状態および、その境界において物性値を与える評価式が整備されている。

なお、ナトリウム（液体）[B3)]についても整備されており、多くの炉型を対象にした解析が出来る。

これらの熱特性データベースを用い、熱バランス評価コードの作成を行った。解析の概要を以下に示す。基本的に、圧力及びエンタルピーの変化に関し評価する。圧力変化に関しては、タービン及び圧縮機の挙動を理解する上でも重要である。圧力変化はプラントの構成要素毎に与えられ、配管、熱交換器などの機器に対しては圧力損失として、圧縮器（圧縮機）、拡張器（タービン）に関しては圧力比として与える。圧縮器の圧力比としては圧縮比（圧縮後の圧力/圧縮前の圧力）で与え、拡張器の圧力比は膨張比（膨張前の圧力/膨張後の圧力）で与える。ここでは、断熱圧縮・断熱膨張を想定するが、必要となるエネルギー（エンタルピー）は断熱効率で補正するものとする。断熱変化ではエントロピー変化がないことを考えると、変化前の温度と圧力から式(B-3)により、エントロピーを評価し、そのエントロピーと外生的に与えられる変化後の圧力から、式(B-3)の関係を再び用い、変化後の温度を暫定的に決定すればよい。式(B-2)

を用いれば、変化前後のエンタルピー変化が評価できる。しかし、ここでは、断熱変化を想定しているので、エンタルピー変化量を膨張に対しては断熱効率を掛け、圧縮に対しては断熱効率で割ることにより、実際のエンタルピーの変化量が評価できる。このエンタルピー変化量に相当する出口温度を再び式(B-2)を用いて評価すればよい。このように、圧力変化に対する諸量の変化は本研究により整備したエンタルピー、エントロピーに関するデータベースを用いれば簡単に評価できる。なお、膨張器、圧縮器に対しては、出入口の質量あたりのエンタルピー変化量を冷却材の質量流量で割ることにより、取り出せるもしくは、投入すべき仕事率を評価することができる。

ただし、配管、機器などによる圧力損失に関しては、本コードではエンタルピーの変化がないものとした。これは、圧力の低下が配管の変形・移動を伴うものでもなければ、その仕事を系外に取り出すわけでもないためである。

同様に、加熱・除熱などによる熱エネルギーの移動がある場合はエンタルピー変化に考慮すれば、加熱器、冷却器、熱交換器などの要素も評価可能である。

熱交換器では、熱交換量を以下のように評価する。

$$Q = \mathrm{UA}\Delta\mathrm{T}_{LMTD} \qquad (\mathrm{B}-4)$$

ここで、U は総括伝熱係数[W/(m²・K)]であり、A は伝熱面積[m²]である。開発コードでは熱交換器の性能として U 値と A 値の積を与えることができる。$\Delta\mathrm{T}_{LMTD}$は対数平均温度差である。流路間の伝熱量を流路に沿って積分することにより導出が可能であり、対向流・並進流共に同じ形で表すことができ、以下のようになる。

対向流：

$$\Delta\mathrm{T}_{LMTD} = \frac{(T_{in}^{1} - T_{out}^{2}) - (T_{out}^{1} - T_{in}^{2})}{\ln\left(\frac{T_{in}^{1} - T_{out}^{2}}{T_{out}^{1} - T_{in}^{2}}\right)} \qquad (\mathrm{B}-5)$$

並進流：

$$\Delta\mathrm{T}_{LMTD} = \frac{(T_{in}^{1} - T_{in}^{2}) - (T_{out}^{1} - T_{out}^{2})}{\ln\left(\frac{T_{in}^{1} - T_{in}^{2}}{T_{out}^{1} - T_{out}^{2}}\right)} \qquad (\mathrm{B}-6)$$

式(B-4)の熱交換量は高温側から低温側へ移動する熱量であるが、式(B-4)を用いなくても、入口、出口のエンタルピー変化により評価が可能である。そこで、それぞれの入口温度が与えられていることに注目すれば、どちらか一方の出口温度を指定すれば、これらの式を一切用いることなく、もう一方の出口温度も決定できる。温度効率が指定された場合も、実質的に一方の出口温度を指定しているのと等価であるため、同等の方法により評価が可能である。その結果から、式(B-4)、式(B-5)、式(B-6)の関係から、熱交換器の設計要求とも言える。U・A 値が評価できる。

このようにして、U・A 値が評価されるもしくは、既に設計されている U・A 値が与えられている場合には、出入口のエンタルピー変化量（厳密には質量流量を掛け、仕事率へ変換したもの）と式(B-4)が合致しなければならない条件から数値的にそれぞれの出口温度が決定できる。初めに、どちらかの出口温度を仮定すれば、エンタルピー変化量からもう一方の出口温度も仮

定できる。式(B-5)、式(B-6)から対数平均温度差が求まり、式(B-4)から熱交換量が求まる。当然、この熱交換量は流路出入口のエンタルピー変化と合致しなければならない。ニュートン法などで数値的に合致する出口温度を探索すれば、与えられたU・A値に対して一意的に両流路の出口温度を決定することができる。

蒸気発生器、復水器の熱交換量に関しては潜熱と質量流量により考慮することも可能であるが、ここでは、参考文献 B2）に示される蒸気表による状態量の圧力及びエンタルピーの関数の形式を用いるものとする。この関数は蒸気表の各領域（水、蒸気、超臨界、飽和状態）の判別と各領域の関数を組み合わせることにより、各領域間をシームレスに扱え、ユーザーは意識をすることなく、エンタルピー変化を与えることができる。サブクール度やクォリティーを明示的に意識する必要はない。使い方としては、熱交換量を決定する指定として相変化を起こさない側の温度指定のみに限定されることとなる。相変化が起これば、一定比熱下でエンタルピー上昇が温度上昇のみに用いられる前提で用いられている対数平均温度差が使えなくなり、本コードの枠組みの中ではU・A値の指定、温度効率の指定も無意味となる。機能自体は変わらないが、ユーザーが明示的に意識できるように名称は、それぞれ、蒸気発生器、復水器とする。

その他、分岐器、合流器を実装した。分岐器は入口側の圧力、温度をそのままに、指定した質量流量比に応じて、入力した質量流量を分割するものである。一方、合流器は複数の流路を一つに束ねるものである。質量流量及びエンタルピーは保存されなければならないが、出口の温度、圧力に関しては、どちらか指定される必要がある。開発コードでは、出口圧力を指定するものとしている。ただし、初期状態では入口側の圧力の内、最も低いものを出口圧力としている。これは、もし、出口側の圧力が入口側の最低圧力よりも高い場合、逆流もしくは、注入ができない事態が発生することを考慮してのことである。この出口圧力への圧力変化は断熱変化を想定し、その分のエンタルピー変化も考慮するものとしている。

プログラムは、オブジェクト指向言語であるC++言語を用いて整備している。オブジェクト指向言語によるプログラムは従来の手続き型言語のプログラムとは異なり、オブジェクト同士の関係性で処理が決定され、実際の論理構造をそのまま具現化できる。オブジェクト毎の独立性が高いため、ソースコードの可読性が高く、オブジェクトの記載に用いられるクラス毎に単体テストを実施すれば、その動作は保証できる。なお、オブジェクト指向言語として有名なJava言語は米国Sun Microsystems社によりオブジェクト指向を意識してC++をベースに開発された言語であり、プラットフォームを選ばない仕様によりWebアプリケーションを中心に広く普及している。また、スクリプト言語の分野でもPython、Rubyなどのオブジェクト指向言語が開発され、現在、プログラミングはオブジェクト指向が主流であると言える。

Fig.B.1 には本コードで用いられるプロセス要素の継承関係を示す。すべての要素はProcessComponent から継承している。ProcessComponent 自体、特別な機能は持たないが、継承関係にすることにより、論理の明示化、派生クラスのオブジェクトを基底クラスのポインタに生成することによる柔軟な扱いが可能となる。なお、本コードでは、局所的なループは許容するものの完全なループは取り扱わず、入口から入力された流量は単一もしくは複数の対応する出口に到達しなければならないものとした。これは、PRO/II コード使用の経験から、必ずしも完全なループでは計算が収束する保証はないこと、結局、各要素の諸元を調整すること

により、収支が取れるようにユーザーが操作する必要があることなどから、今回は完全に閉じたループは扱わないこととした。完全に閉じたループを設計する場合には、ユーザーは本来閉じるべきである、入口と出口の流量、圧力、温度が合致するように操作すればよい。そのために、Inlet,Outlet の 2 要素を実装した。

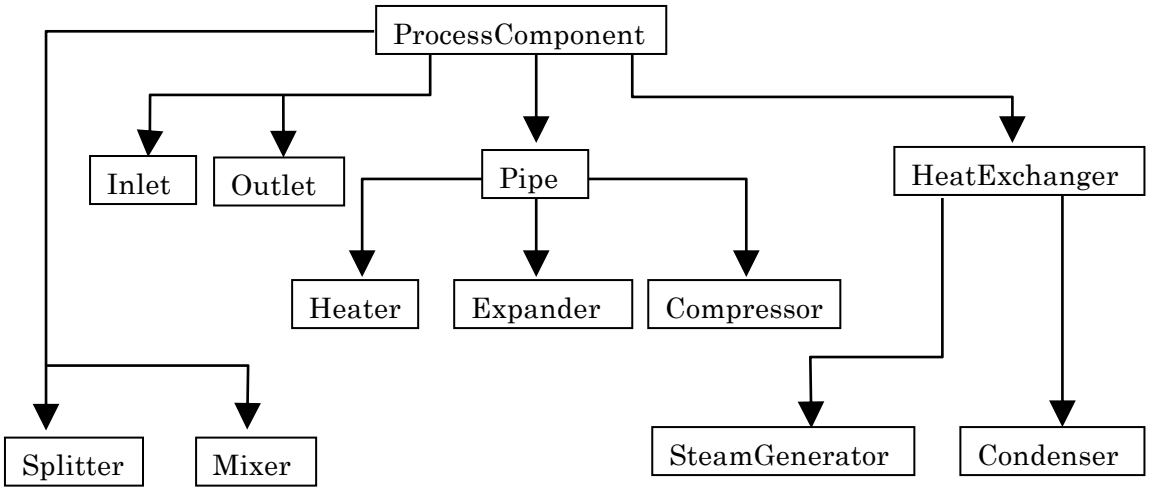
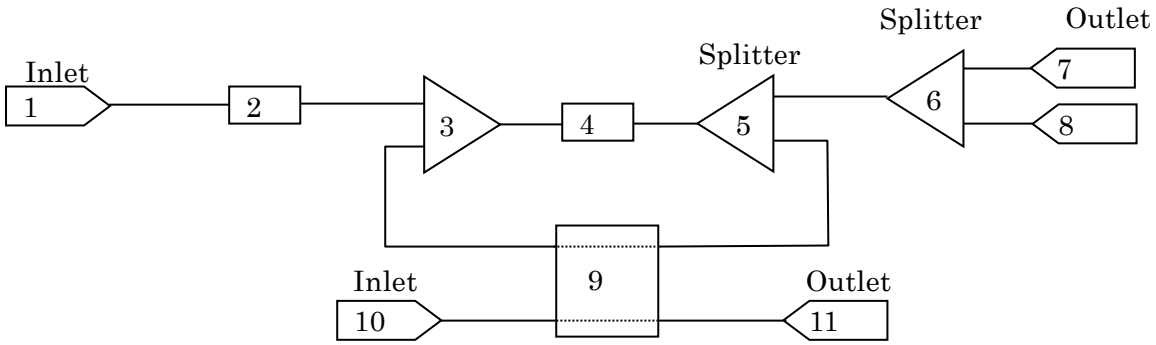


Fig. B.1 Inheritance relation of developed code

これらの 2 要素以外の要素は、基本的に一つ以上の入口と出口を持ち、それぞれに他の要素を指定する。Pipe 要素は一つの入口と一つの出口を持ち圧力損失を扱える最低限の要素である。この条件を兼ね備えるものは、Pipe を継承し派生する。Heater（加熱器）、Expander（拡張器）、Compressor（圧縮器）がこれに当たる。一方で、複数の入口を持つ Mixer（混合器）、複数の出口を持つ Splitter（分岐器）、2 つの入口、2 つの出口を持つ HeatExchanger（熱交換器）は ProcessComponent を直接継承している。また、HeatExchanger から SteamGenerator、Condenser が派生する。

計算処理には PRO/II と同様に弱連成とする。初めに、Inlet から Outlet に至るまでの経路を探索する。Splitter で経路は分岐し、もし、局所的なループがあれば、再び Splitter に至るところで、経路を打ち切る。分岐経路の最後に Splitter を加えることにより、分岐経路の計算が Splitter の別の下流側にも反映される。この複数の経路を順番に繰り返し計算することにより解を得る。処理の模式図を Fig.B.2 に示す。ユーザーはパス内部の反復回数とパス外部（パス間）の反復回数を指定する。パス内部の反復が指定されると、処理が分岐する Level2 以降において、レベル毎に指定の回数だけ反復計算が行われ、順に下の階層のレベルに移動していく。パス内部の計算が終了すると、異なる Inlet から始まる別のパスに同様の処理が移行する。パス間の反復は、パス外部の反復回数として与えられた回数だけ行われる。収束判定機能は設けていないが、出力される各要素の入出力諸元を比較すれば収束の具合が確認できる。なお、HeatExchanger、SteamGenerator、Condenser が異なる Inlet からのパスをつないでいる場合は、スイープが終了しなければ、入口条件が設定されないこととなる。その場合外部反復は

最低２回以上としなければならない。



Path decomposition：

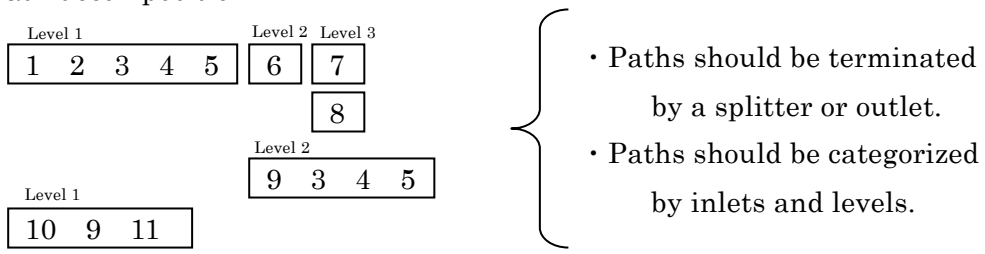


Fig. B.2 Path decomposition of developed code

作成したコードの挙動を確認するため、2 つのケースについて解析を実施し検証した。一つは目的の高温ガス炉の解析 B4,B5)であり、もう一つは、ナトリウムの物性、水・蒸気系の動作確認を兼ねた、高速増殖炉もんじゅの解析 B6)である。それぞれ、文献から抽出した値と解析結果の比較を Fig.B3,Fig.B4 に示す。十分な精度での文献値の再現を確認した。

また、参考のために、コード検証に用いた入力ファイルを Fig.B5,Fig.B6 に示す。なお、入力はマークアップ言語 YAML の様式に従うものとした。出力は直接、表計算ソフト EXCEL のファイルを吐き出すものとしている。登録したコンポーネント毎に計算条件と計算結果が出力される。開発は Linux 上で行っているが、Windows 用コンパイラ MinGW を用いることにより、Windows バイナリも整備した。Gtkmm を用い最低限の GUI を整備しており、コマンドラインに不慣れなユーザーでも使えるものとした。

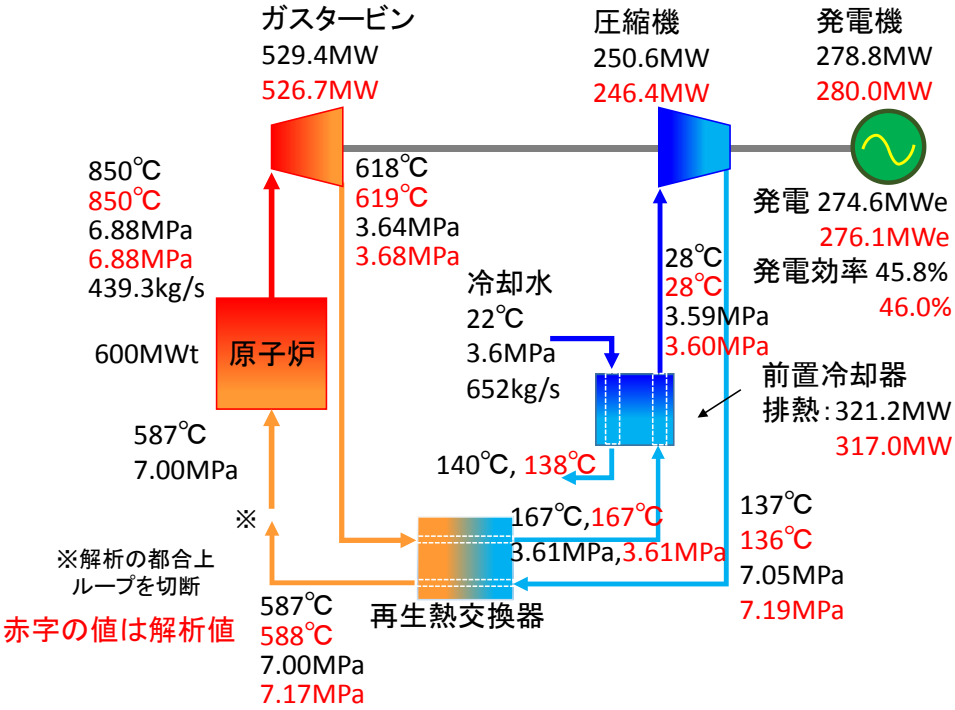


Fig. B.3 Heat balance of HTGR

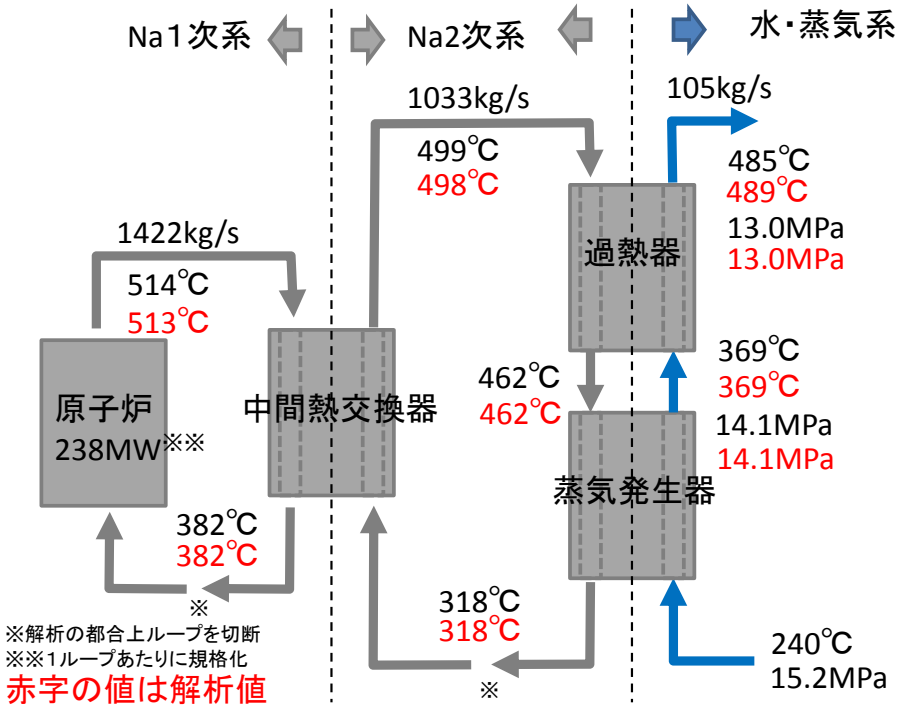


Fig. B.4 Heat balance of Monju

```
# control data
output_path: ./gthtr300.xls
outer_iteration:   5
inner_iteration: 10

# resistration of component
component_info:

  reactor_inlet:
    component_type: inlet
    fluid: helium
    pressure: 7.0
    unit_of_pressure: MPa
    flow_rate: 439.3
    unit_of_flow_rate: kg/s
    temperature: 587
    unit_of_temperature: C
    outlet: reactor

  reactor:
    component_type: heater
    power: 600.0
    unit_of_power: MW
    pressure_drop: 0.12
    unit_of_pressure_drop: MPa
    inlet: reactor_inlet
    outlet: turbine

  turbine:
    component_type: expander
    expansion_ratio: 1.87
    adiabatic_efficiency: 0.928
    inlet: reactor
    outlet: recuperator

  recuperator:
    component_type: heat_exchanger
    outlet_temperature_1: 167.0
    unit_of_outlet_temperature_1: C
    inlet_1:   turbine
    outlet_1: precooler
    pressure_drop_1: 0.060
    unit_of_pressure_drop_1: MPa
    inlet_2: compressor
    outlet_2: recuperator_outlet
    pressure_drop_2: 0.029
    unit_of_pressure_drop_2: MPa
```

Fig. B.5 Input file for HTGR calculation (1/2)

```
precooler:
   component_type: heat_exchanger
   outlet_temperature_1: 28.0
   unit_of_outlet_temperature_1: C
   inlet_1: recuperator
   outlet_1: compressor
   pressure_drop_1: 0.021
   unit_of_pressure_drop_1: MPa
   inlet_2: waste_heat_inlet
   outlet_2: waste_heat_outlet
   pressure_drop_2: 0.0
   unit_of_pressure_drop_2: MPa

waste_heat_inlet:
   component_type: inlet
   fluid: light_water
   pressure: 3.6
   unit_of_pressure: MPa
   flow_rate: 652
   unit_of_flow_rate: kg/s
   temperature: 22
   unit_of_temperature: C
   outlet: precooler

waste_heat_outlet:
   component_type: outlet
   inlet: precooler

compressor:
   component_type: compressor
   compression_ratio: 2.0
   adiabatic_efficiency: 0.891
   inlet: precooler
   outlet: recuperator

recuperator_outlet:
   component_type: outlet
   inlet: recuperator
```

Fig. B.5 Input file for HTGR calculation (2/2)

```
# control data
output_path: ./monju.xls
outer_iteration:   5
inner_iteration: 10

# resistration of component
component_info:

  reactor_inlet:
    component_type: inlet
    fluid: sodium
    pressure: 1.0
    unit_of_pressure: MPa
    flow_rate: 1422.0
    unit_of_flow_rate: kg/s
    temperature: 382.0
    unit_of_temperature: C
    outlet: reactor

  reactor:
    component_type: heater
    power: 238.0
    unit_of_power: MW
    pressure_drop: 0.0
    unit_of_pressure_drop: MPa
    inlet: reactor_inlet
    outlet: ihx

  ihx:
    component_type: heat_exchanger
    outlet_temperature_1: 382.0
    unit_of_outlet_temperature_1: C
    inlet_1:   reactor
    outlet_1: ihx_outlet
    pressure_drop_1: 0.0
    unit_of_pressure_drop_1: MPa
    inlet_2: ihx_inlet_2
    outlet_2: steam_heater
    pressure_drop_2: 0.0
    unit_of_pressure_drop_2: MPa

  ihx_outlet:
    component_type: outlet
    inlet: ihx
```

Fig. B.6 Input file for Monju calculation (1/3)

```
ihx_inlet_2:
   component_type: inlet
   fluid: sodium
   pressure: 1.0
   unit_of_pressure: MPa
   flow_rate: 1033.0
   unit_of_flow_rate: kg/s
   temperature: 318.0
   unit_of_temperature: C
   outlet: ihx

steam_heater:
   component_type: heat_exchanger
   outlet_temperature_1: 462.0
   unit_of_outlet_temperature_1: C
   inlet_1:   ihx
   outlet_1: evaporator
   pressure_drop_1: 0.0
   unit_of_pressure_drop_1: MPa
   inlet_2: evaporator
   outlet_2: water_outlet
   pressure_drop_2: 1.1
   unit_of_pressure_drop_2: MPa

evaporator:
   component_type: steam_generator
   outlet_temperature_1: 318.0
   unit_of_outlet_temperature_1: C
   inlet_1:   steam_heater
   outlet_1: evaporator_outlet
   pressure_drop_1: 0.0
   unit_of_pressure_drop_1: MPa
   inlet_2: water_inlet
   outlet_2: steam_heater
   pressure_drop_2: 1.1
   unit_of_pressure_drop_2: MPa

evaporator_outlet:
   component_type: outlet
   inlet: evaporator
```

Fig. B.6 Input file for Monju calculation (2/3)

```
water_inlet:
   component_type: inlet
   fluid: light_water
   pressure: 15.2
   unit_of_pressure: MPa
   flow_rate: 105.0
   unit_of_flow_rate: kg/s
   temperature: 240.0
   unit_of_temperature: C
   outlet: evaporator

water_outlet:
   component_type: outlet
   inlet: steam_heater
```

Fig. B.6 Input file for Monju calculation (3/3)

参考文献：

B1) 深谷 裕司, 後藤 実, 西原 哲夫,” クリーンバーン高温ガス炉詳細設計のための核設計モデルの整備”, JAEA-Technology 2015-017, 61p,(2015).

B2) W. Wagner, H. Kretzschmar, “International Steam Tables,” Springer, (2007).

B3) J. K. Fink, L. Leibowitz, “Thermodynamic and Transport Properties of Sodium Liquid and Vapor, ” ANL/RE-95/2 (1995).

B4) 高田 昌二, 滝塚 貴和, 國富 一彦他,” 高温ガス炉ガスタービン発電システム(GTHTR300)の発電系設計”, 日本原子力学会和文論文誌, 1(4), pp.341 - 351, (2002).

B5) Y. Kamiji, H. Noguchi, A. Terada, “Flowsheet study of a multistage flash desalination system for cogeneration with high temperature gas-cooled reactor,” ICONE-22, (2014).

B6) 丹治 幹雄, 菱田 正彦, 兼為 美佳子,”もんじゅ安全裕度評価用データの整備”, JNC-TJ4410 2000-003, 1481p,(1999).

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量，比エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ s\ A$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ s\ A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L，l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1 t=10^3 kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10^{-19}J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10^{-27}kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10^{11}m

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10^5Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	1 b=100fm^2=$(10^{-12}cm)^2$=$10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デシベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =$1cm^2\ s^{-1}$=$10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド[a]	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$A m^{-1}

(a) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		1 フェルミ=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）